

# TEKNILLINEN KORKEAKOULU

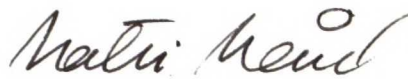
Sähkötekniikan osasto

Reijo Komsa

JÄNNITTEENNOSTOMUUNTAJAN JA TYRISTORISILLAN SOVELTUVUUS DIODISILLAN RINNALLA TASAJÄNNITEVÄLIPIIRIN VERKKOONJARRUTUKSESSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa

Työn valvoja



Matti Mård

Työn ohjaaja



Matti Kauhanen

19596

TKK SÄHKÖTEKNIKAN  
OSASTON KIRJASTO  
OTAKAARI 5 A  
02150 ESPOO

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Pitäjänmäellä ABB Industry Oy:n Engineered AC-Drives tulosityksikössä. Työn valvojana on toiminut Teknillisen korkeakoulun Sähkökäytön ja tehoelektroniikan professori Matti Mård, jolle tahdon osoittaa kiitokseni hänen työtäni kohtaan osoittamastaan kiinnostuksesta. Samalla haluan kiittää DI Matti Kauhasta mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta sekä opastuksesta työn aikana. Suuret kiitokset myös kaikille ACV- ja SAMI STAR-osastoilla työskenteleville siitä teknisestä tuesta, joka on edesauttanut tämän työn valmistumista.

Helsingissä 01.01.95

Reijo Komsa

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Reijo Komsu		
Työn nimi:	Jännitteennostomuuntajan ja tyristorisillan soveltuvuus diodisillan rinnalla tasajännitevälipiirin verkkoonjarrutuksessa		
Päivämäärä:	12.01.95	Sivumäärä:	65
Osasto:	Sähkötekniikan osasto		
Professuuri:	S-81 Sähkökäyttö ja tehoelektroniikka		
Työn valvoja:	Professori Matti Mård		
Työn ohjaaja:	DI Matti Kauhanen		
<p>Tässä työssä tutkitaan tasajännitevälipiirillä varustetun säädetyin vaihtovirtakäytön jarrutusta täysin uuden konseptin pohjalta. Jarrutusenergian uudelleenkäyttöön on olemassa kolme erilaista periaatetta, joita käytetään eri sovelluksissa riippuen tehosta, sallituista häiriöistä ja luotettavuudesta.</p> <p>Tässä työssä tutkitaan mahdollisuutta käyttää tyristorisiltaa diodisillan rinnalla verkkoonjarrutuksessa. Nostamalla tyristorisillan jännitettä säästömuuntajalla, voidaan kasvattaa kommutointikykyä. Jarrutuksen aikana voidaan välipiirin jännite pitää nimellisenä, toisin kuin ilman nostomuuntajaa toimittaessa. Tästä on etua erityisesti ryhmäkäytöissä, joissa moottoreiden toiminta ei ole tiukasti sidoksissa toisiinsa.</p> <p>Laitteiston toiminta on huomattavan monimutkaista verrattuna tavallisen vastarinnankytketyn tyristorisillan toimintaan. Koska diodisillan johtamista ei estetä jarrutuksen aikana, syntyy siltojen ja vaiheiden välille kiertovirtoja.</p> <p>Jännitteennostomuuntaja on keskeinen komponentti koko jarrutuskonseptissa. Muuntajan rakenteella ja kytkennällä voidaan vaikuttaa kiertovirtoihin ja hyötysyhteeseen. Lisäksi muuntaja on laitteiston merkittävin kustannustekijä.</p>			
Avainsanat:	Diodisilta, tyristorisilta, vaihtovirtakäyttö, säästömuuntaja, verkkoonjarrutus		

**HELSINKI UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY**

**ABSTRACT OF THE  
MASTER'S THESIS**

Author:	Reijo Komsa		
Name of the thesis:	Regenerative line supply with step-up transformer and antiparallel diode-/thyristor bridge for DC-bus oriented PWM AC systems		
Date:	12.01.95	Number of pages:	65
Faculty:	Electrical Engineering		
Professorship:	S-81 Electric Drives and Power Electronics		
Supervisor:	Professor Matti Mård		
Instructor:	Matti Kauhanen, M.Sc.		
<p>In this thesis a completely new regeneration concept is studied. Instead of traditional antiparallel thyristor bridge a diode bridge has been installed in antiparallel with the thyristor bridge. The net voltage of the thyristor bridge has been raised by an autotransformer.</p> <p>The most significant advantages of this new concept are higher DC-voltage when braking and simple changeover from motoring to braking. Because of the galvanic connection between the autotransformer primary and secondary windings the diode bridge and thyristor bridge are conducting simultaneously. Quite high circulating currents have been simulated and measured. The level of the circulating current is depending on the firing angle of the thyristor and the level of the DC-voltage.</p> <p>The thyristors can be modulated also when motoring. This means rapid response in case the motors change to generating mode. The simultaneous modulation is not recommended when operating in weak network, because netfalls may cause commutation failures and burned fuses.</p> <p>The construction and connection of the step-up transformer are affecting the circulating currents. When using isolated transformer there are no circulating currents, but the system is very expensive. In every case, the transformer is the most expensive component of the whole supply unit.</p>			
Keywords:	Diode bridge, thyristor bridge, AC - drive, autotransformer, regeneration		



Alkulause.....	I
Tiivistelmä.....	II
Abstract.....	III
Sisällysluettelo.....	IV
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	VII
1. Johdanto.....	1
2. Sähkökäytöt .....	2
2.1 Yksittäiskäyttö.....	2
2.2 Ryhmäkäyttö .....	3
2.3 Linjakäyttö .....	3
2.4 Vaihtosuuntaaja moottori- ja generaattorikäytössä .....	4
3. Jarrutus .....	4
3.1 Vastusjarrutus.....	4
3.2 Jarrutus verkkoon .....	5
3.2.1 Pakkokommutoitu vaihtosuuntaaja.....	5
3.2.2 Verkkokommutoitu vaihtosuuntaaja.....	6
3.3 Jarrutusmenetelmien vertailua.....	6
4. Jarrutusmenetelmän valinta .....	7
4.1 Kiertovirrallinen vastarinnankytketty tyristorisilta .....	8
4.2 Kiertovirraton vastarinnankytketty tyristorisilta .....	8
4.2.1 Muuntaja generaattorisillalla.....	9
4.3 Yksi silta ja suunnanvaihtokytkin .....	9
4.4 Vastarinnankytketty diodi/tyristorisilta ja nostomuuntaja .....	10
4.4.1 Diodisilta.....	11
4.4.2 Tyristorisilta.....	11
4.4.3 Säästömuuntaja .....	11
5. DCV 700 tasavirtakäyttö verkkoonjarrutuksessa .....	14
5.1 DC94 ASIC .....	15
5.2 Mittaukset.....	16
5.2.1 DC-jännitteen mittaaminen .....	16
5.2.2 Verkon jännitteen mittaaminen .....	17
5.2.3 Virran mittaaminen .....	17
5.2.4 Lämpötilan mittaaminen .....	18
5.3 Sytytyspulssien generointi.....	18
5.4 Tahdistus verkkoon .....	20
5.5 Suojaukset .....	20
5.6 Kommunikointi .....	21
5.7 Sääto .....	22
5.8 Sovellutus syöttöyksikköön.....	22
6. Ohjauskonsepti ja alkuarvojen määrittäminen .....	23
7. Toiminnan analyysi .....	27
7.1 Vaihevirta aukollista.....	28
7.2 Vaihevirta jatkuvaa .....	34
7.3 Kuristimen virta jatkuvaa, vaihevirta aukollista .....	35

7.4 Askelvaste .....	36
7.5 Askelvaste epäsymmetrisessä verkossa .....	37
7.6 Vaihejännitteen harmonisten vaikutus .....	38
8. Kommutoinnin analyysi .....	39
9. Jännitteennostomuuntajan kytkentä.....	45
9.1 Tähtipisteet yhdessä .....	45
9.2 Tähtipisteet erotettu.....	48
9.3 Syöttömuuntajassa lisäulosotot .....	52
9.4 Erotettu nostomuuntaja .....	54
10. Kiertovirran ja välipiirin virran suhde .....	57
11. Tehokerroin ja virran harmoniset .....	58
11.1 Tehokerroin .....	58
11.2 Vaihevirran harmoniset .....	60
12. Johtopäätökset .....	62
VIITELUETTELO .....	64

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

$C$	kapasitanssi
$E$	tasajännite
$I$	virta
$J$	hitausmomentti
$L$	induktanssi
$M$	keskinäisinduktanssi
$N$	muuntajan käämikierrosten lukumäärä
$P$	pätöteho
$Q$	loisteho
$R$	resistanssi
$S$	näennäisteho
$T$	momentti
$U$	jännite
$+U_c$	välipiirin positiivisen kiskon jännite
$-U_c$	välipiirin negatiivisen kiskon jännite
$U$	kolmivaiheverkon vaihe
$V$	kolmivaiheverkon vaihe
$W$	kolmivaiheverkon vaihe
$W$	energia
$X$	reaktanssi

N-kisko välipiirin negatiivinen DC-kisko

P-kisko välipiirin positiivinen DC-kisko

U11	moottorisillan U-vaiheen ylähaaran kytkin
U12	moottorisillan U-vaiheen alahaaran kytkin
U21	generaattorisillan U-vaiheen ylähaaran kytkin
U22	generaattorisillan U-vaiheen alahaaran kytkin
V11	moottorisillan V-vaiheen ylähaaran kytkin
V12	moottorisillan V-vaiheen alahaaran kytkin
V21	generaattorisillan V-vaiheen ylähaaran kytkin
V22	generaattorisillan V-vaiheen alahaaran kytkin
W11	moottorisillan W-vaiheen ylähaaran kytkin
W12	moottorisillan W-vaiheen alahaaran kytkin
W21	generaattorisillan W-vaiheen ylähaaran kytkin
W22	generaattorisillan V-vaiheen alahaaran kytkin

$f$	taajuus
$i$	virran hetkellisarvo
$n$	moottorin pyörimisnopeus
$p$	suuntaajan pulssiluku
$t$	aika
$u_u$	U-vaiheen jännitteen hetkellisarvo
$u_v$	V-vaiheen jännitteen hetkellisarvo
$u_w$	W-vaiheen jännitteen hetkellisarvo
$\alpha$	tyristorin sytytyskulma
$\gamma$	virran yliaaltosisältö
$\varphi$	vaihesiirtokulma
$\lambda$	tehokerroin
$\Lambda$	permeanssi
$\mu$	kommutointikulma
$\mu$	muuntosuhde
$\omega$	kulmanopeus



## 1. Johdanto

Teollisuudessa esiintyy useita sovellusalueita, joissa säädetyn vaihtovirtakäytön jarrutusenergia halutaan syöttää takaisin sähköverkkoon. Keskitheoisissa käytöissä (250 kVA...2500 kVA) jarrutuslaitteistona on yleisesti käytetty vastarinnankytkettyä verkkokommutoitua tyristorisiltaa. Uusissa käytöissä suuntaus on pakkokommutoituihin vaihtosuuntaajiin, joilla on kiistattomat etunsa verrattuna verkkokommutoituihin vaihtosuuntaajiin.

ABB Industry käyttää systeemikäytöissä vastarinnankytkettyä tyristorisiltaa ja alennettua jännitettä verkkoonjarrutuksessa. Laitteisto on suunniteltu 1970-luvun lopulla. Vanhentunut tekniikka ja havaitut puutteet vaikuttivat siihen, että laitteisto päätettiin uudistaa vastaamaan tämän päivän vaatimuksia.

Tässä työssä on tutkittu mahdollisuutta käyttää uutta tasavirtakäyttöä DCV 700 säädettyä vaihtovirtakäytön ACV 700 verkkoonjarrutuksessa täysin uuden konseptin pohjalta. Työ jakaantuu neljään osaan.

Ensimmäisessä osassa tarkastellaan ja vertaillaan eri jarrutusmenetelmiä verkkohäiriöiden, luotettavuuden ja hinnan kannalta.

Toisessa osassa esitellään uutta verkkokommutoituilla tyristoreilla varustettua tasavirtakäyttöä ja tarkastellaan sen soveltamista tasajännitevälipiirillä varustetun systeemikäytön verkkoonjarrutukseen uuden konseptin pohjalta.

Kolmannessa osassa analysoidaan teoreettisesti ja simuloimalla uutta jarrutuskonseptia. Jarrutuslaitteistossa on vastarinnankytketty diodi-/tyristorisilta ja tyristorisillan jännitettä nostetaan säästömuuntajalla. Analyysi on tehty ideaalitalanteessa, jossa verkon impedanssit ovat nollija ja kommutoinnit tapahtuvat äärettömän nopeasti. Staattisen tilan analyysin lisäksi laitteiston toimintaa tutkitaan dynaamisessa tilanteessa ja erilaisissa häiriötilanteissa (epäsymmetrinen verkko, harmonisia komponentteja laitteiston syöttöjännitteissä). Lopuksi jatketaan staattisen tilan analyysiä, kun verkon impedanssit ja kommutoinnit otetaan huomioon.

Jännitteennostomuuntajan kytkennällä voidaan vaikuttaa laitteiston toimintaan, hyötysuhteeseen ja kiertovirtoihin. Mittauksia varten rakennettiin protolaitteisto, jossa käytettiin säästömuuntajaa. Mittaustuloksia verrataan simuloituihin teoreettisiin tuloksiin. Lisäksi verrataan keskenään erilaisia muuntajakytkentöjä.

Neljännessä osassa tarkastellaan kiertovirran osuutta, jarrutustehoa, tehokerrointa ja vaihevirran harmonisia. Kiertovirrat huonontavat tehokerrointa ja lisäävät harmonisia. Epäsymmetriset kiertovirrat ja vaihevirran harmoniset komponentit lisäävät syöttömuuntajan, nostomuuntajan ja tyristorisillan mitoitusarvetta. Loppupäätelmänä mietitään, onko tutkittava laitteisto taloudellisesti kilpailukykyinen ratkaisu.

## 2. Sähkökäytöt

Sähkökäytöt voidaan jakaa tehonsyötön mukaan yksittäiskäyttöihin ja ryhmä- sekä linjakäyttöihin /3/. Sähkökäyttö koostuu neljästä suuremmasta lohkosta

- verkkoyksikkö
- välipiiri
- vaihtosuuntaaja
- moottori

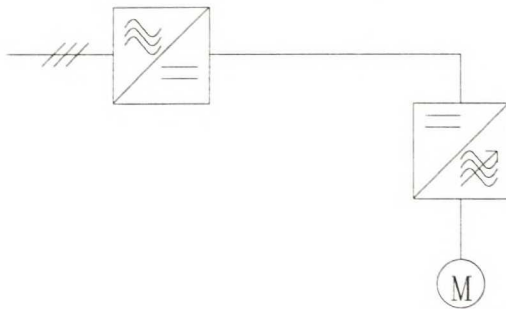
Verkkoyksikkö sisältää tasasuuntausosan, kuristimen, kondensaattoriyksikön, erottimet, kontaktorit, sulakkeet, verkon valvonnan ja mahdollisen verkkoonjarrutusyksikön. Verkkoyksikön tehtävänä on jännitteen tasasuuntaus ja mahdollinen vaihtosuuntaus.

Tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan välillä voi olla joko virta- tai jännitevälipiiri. Tässä työssä tutkitaan tasajännitevälipiirillä varustettua sähkökäyttöä, jossa käyttömoottorina on oikosulkumoottori.

Vaihtosuuntaaja muuntaa välipiirin tasajännitteen kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi, joka syötetään oikosulkumoottorille. Tasajännitteen heilahtelu aiheuttaa momenttirippeliä moottoreilla. Siksi onkin tärkeää, että tasajännite saadaan pysymään mahdollisimman vakiona.

### 2.1 Yksittäiskäyttö

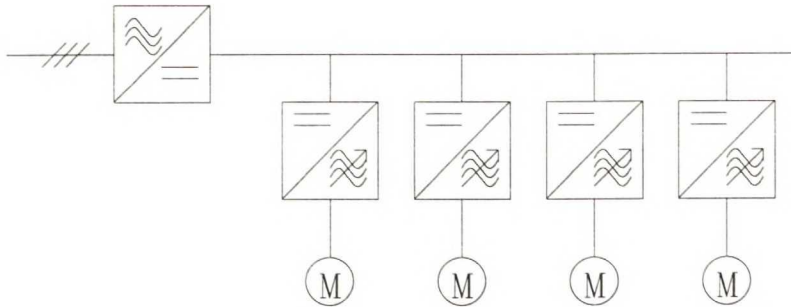
Yksittäiskäytössä yksi verkkoyksikkö syöttää ainoastaan yhtä vaihtosuuntaajaa. Vaihtosuuntaaja voi kylläkin syöttää useita moottoreita. Vaihtosuuntaajan toimintaa ohjataan joko ohjauspaneelilla, erillisillä kytkimillä tai ylemmän tason ohjausjärjestelmästä digitaalisilla ja analogisilla viesteillä.



Kuva 2.1 Yksittäiskäytön periaate

## 2.2 Ryhmäkäyttö

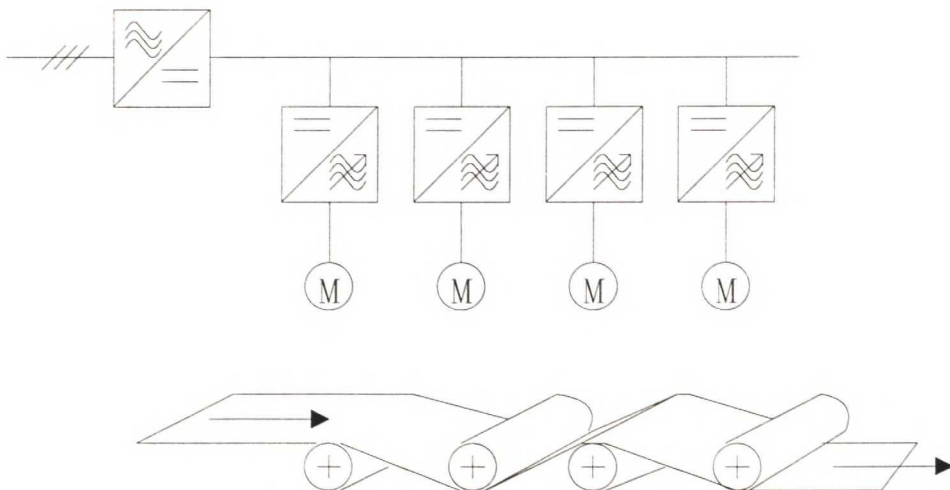
Ryhmäkäytössä välipiirissä on useampia vaihtosuuntaajia. Vaihtosuuntaajien syöttämät moottorit pyörivät suhteellisen itsenäisesti. Eri moottorit pyörittävät samaan tai eri prosessiin kuuluvia työkoneita, mutta moottoreiden välillä ei ole tarkkoja vaatimuksia yhtenevästä pyörimisnopeudesta.



Kuva 2.2 Ryhmäkäytön periaate

## 2.3 Linjakäyttö

Linjakäyttö on vaativin osa-alue sähkökäytöistä. Samaan välipiiriin on kytketty useita vaihtosuuntaajia. Vaihtosuuntaajien toimintaa ohjataan ohjearvoketjulla, joka tulee ylemmän tason ohjausjärjestelmästä (drive's common control system). Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi paperikoneet ja metalliteollisuuden rullarakäytöt. Sähkökäytön tehtävänä on tuottaa mekaanista energiaa, jota tarvitaan rullien pyörittämiseen. Käyttö ohjaa myös energian virtausta syöttöverkon ja rullien välillä siten, että rullilla oleva materiaali liikkuu täsmälleen prosessin vaatimalla tavalla.



Kuva 2.3 Linjakäytön periaate (ratakäyttö)



## 2.4 Vaihtosuuntaaja moottori- ja generaattorikäytössä

Vaihtosuuntaaja voi toimia neljässä quadrantissa. Kun välipiiriin kytketyt vaihtosuuntaajat syöttävät moottoreita, jotka toimivat ensimmäisessä tai kolmannessa neljänneksessä, on tehon suunta välipiiristä moottoreihin. Mikäli moottoreiden kuormitus muuttuu siten, että yksi tai useita moottoreista toimii generaattorina (toinen tai neljäs neljännes), alkaa näiden moottoreiden tuottama generaattoriteho virrata vaihtosuuntaajan kautta välipiiriin. Tällöin välipiirin verkosta ottama teho pienenee ja moottorien generaattoriteho lataa välipiirin kondensaattoreita. Jos generaattoreina toimivien moottoreiden tuottamaa tehoa ei pystytä kuluttamaan muissa moottoreissa, nousee välipiirin jännite.

Välipiirin jännite pidetään mahdollisimman vakiona, jotta välttyttäisiin momentin heilahteluilta. Suuret ylijännitteet välipiirissä ovat lisäksi vaarallisia vaihtosuuntaajan ja verkkoyksikön puolijohdekytkimille.

Tyypillisiä moottori-/generaattorikäyttöjä ovat paperikoneet, rullaradat metalliteollisuudessa, pumput ja puhaltimet, hissit ja nosturit sekä erilaiset linkokäytöt. Yleensäkin sellaiset käytöt, missä on kuormituksena on suhteellisen suuri hitausmassa ja lisäksi tarvitaan nopeaa jarrutusta.

## 3. Jarrutus

Generaattoritehon kuluttamiseen on olemassa erilaisia keinoja. Teho voidaan joko hukata vastuksissa lämpötehona tai syöttää takaisin sähköverkkoon. Jarrutuksessa syntyvä energia  $W$  riippuu kuorman ja moottorin hitausmassasta  $J$ , moottorin hidastumisnopeudesta  $d\omega/dt$ , vastamomentista  $T_v$  ja pyörimisnopeudesta  $\omega$

$$T = T_v + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.1)$$

$$P = T\omega \quad (3.2)$$

$$W = Pt \quad (3.3)$$

### 3.1 Vastusjarrutus

Helpoin ja yksinkertaisin tapa jarrutusenergian kuluttamiseen on syöttää se erityisen hakkuripiirin kautta jarruvastukseen. Tämä soveltuu tilanteisiin, jolloin jarrutustehot ovat pieniä, eikä vastuksessa syntyvä lämpö aiheuta ongelmia.

Vastuksissa syntyvä lämpö voidaan käyttää hyödyksi joko veden tai ilman lämmityksessä. Esimerkiksi sähköjunien vaunujen lämmitys tapahtuu ohjaamalla junan jarrutusenergia lämmitysvastuksiin.



### 3.2 Jarrutus verkkoon

Varsinkin suurissa käytöissä on edullista syöttää jarrutusenergia takaisin verkkoon. Esimerkiksi paperikoneen alasajossa saattaa jarrutus kestää useita minuutteja. Suuren jarrutustehon syöttäminen jarruvastuksiin aiheuttaisi merkittävän lämpötilan nousun. Vastuspaketti olisi suurikokoinen ja vaatisi tehokkaan jäähdytyksen. Jarrutusenergian syöttäminen verkkoon ei välttämättä merkitse suuria säästöjä energiakustannuksissa. Merkittävämpi etu on energian huomaamaton uudelleen-sijoittaminen.

Verkkoonjarrutus voi tapahtua periaatteessa kahdella eri tavalla: verkkokommutoivalla tai pakkokommutoivalla vaihtosuuntaajalla. Kumpikin jarrutustapa aiheuttaa verkkoon säröä, mutta niillä on myös kiistattomat etunsa tietyillä sovellus-alueilla.

#### 3.2.1 Pakkokommutoitu vaihtosuuntaaja

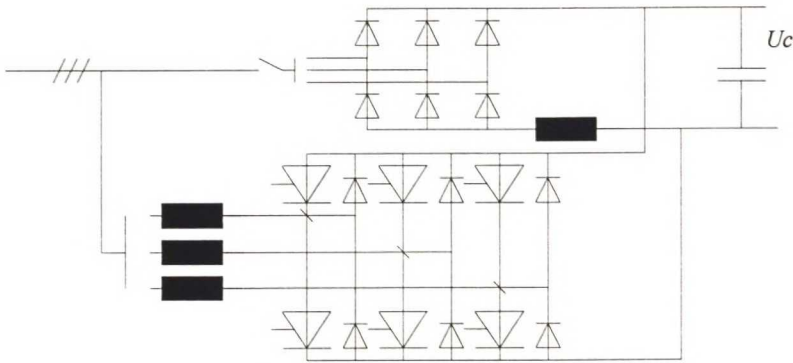
Vaihtosuuntaajana käytetään invertteriä, jossa on kytkiminä joko

- GTR-transistori
- IGBT-transistori
- GTO-tyristori

Transistoreiden kytkintehot ja jännitekestoisuudet ovat suhteellisen pieniä verrattuna GTO-tyristoreihin. Mutta toisaalta GTO:t ovat varsin kalliita. Transistoreiden tai transistorivaihtosuuntaajien rinnankytkennällä ei välttämättä saavuteta GTO-vaihtosuuntaajan tehoja.

Pakkokommutoidun vaihtosuuntaajan vaihevirta muistuttaa enemmän siniaaltoa kuin vastaavan verkkokommutoidun vaihtosuuntaajan vaihevirta. Virran harmoniset ovat pieniä ja tehokerroin on  $\sim 1$ . Kommutointi ja verkkokatkokset eivät ole ongelmallisia.

Kuvassa 3.1 on esitelty periaatteellinen ratkaisu pakkokommutoidusta verkko-vaihtosuuntaajasta /4/. Vaihtosuuntaajan nolladiodit toimivat tasasuuntaussilta-na. Näiden rinnalle voidaan kytkeä oma erillinen diodisilta. Invertterin ja verkon väliin tarvitaan suodatinyksikkö, joka sisältää kolmivaiheisen kuristimen. Invertteri on kuitenkin varsin kallis ratkaisu verrattuna verkkokommutoivaan tyristorisiltaan.



Kuva 3.1 Verkkovaihtosuuntaaja

Päinvastoin kuin verkkokommutoivalla tyristorisillalla GTO-invertterillä on tasajännitteen minimiraja, jonka yläpuolella laite vasta voi toimia. Tämä jännite on sama kuin kuormittamattoman diodisillan tasajännite. Jos tasajännite laskee tämän alle, ei invertteri kykene tuottamaan riittävän suurta vastajännitettä kolmivaihepuolelle ja se ottaa verkosta induktiivista loistehoa - sitä enemmän mitä alhaisempi on tasajännite. Sitävastoin syntyvällä tasajännitteellä ei ole muuta käytännön ylärajaa kuin ylijännitelaukaisuraja.

### 3.2.2 Verkkokommutoitu vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajan kytkinkomponenttina on tavallinen verkkokommutoiva tyristori. Tavallinen tyristori on GTO:ta edullisempi suurilla tehoilla ja suurilla jännitteillä. Lisäksi sen ohjaaminen on yksinkertaisempaa. Toisaalta verkkokommutoinnista aiheutuu komponentin suurimmat ongelmat. Kommutointi on otettava tarkasti huomioon hilapulssiohjauksissa (kommutointivara). Toinen ongelma on verkkokatkokset. Johtavaa tyristoria ei saada sammumaan verkon jännitteen hävitessä. Tällöinhän tyristoreilla ei ole sammuttavaa vastajännitettä.

Vaihevirta sisältää harmonisia komponentteja, joista merkittäviä ovat 5. ja 7. yliaalto. Tehokerroin riippuu tyristorien ohjauskulmasta. Lisäksi virran kommutointi aiheuttaa verkon jännitteeseen kommutointilovia. Kommutointilövet vaikeuttavat tahdistusta ja jännitteen mittausta.

### 3.3 Jarrutusmenetelmien vertailua

Jarrutusmenetelmä kannattaa valita tehon ja jännitteen mukaan. Pienillä tehoilla on edullista käyttää vastusjarrutusta tai pakkokommutoitua vaihtosuuntaajaa. Pakkokommutoivat komponentit selviytyvät verkkokatkoksesta. Lisäksi verkon tehokerroin  $\cos\phi$  on säädettävissä.

Korkeilla verkkojännitteillä ja suurilla jarrutustehoilla on edullisempaa käyttää verkkokommutoivia tyristoreita. Vaikka suuritehoinen tyristorisilta on varsin kallis, niin silti se tulee halvemmaksi kuin useilla rinnan-/sarjaankytketyillä pakkokommutoivilla komponenteilla tai vaihtosuuntaussilloilla toteutettu samantehoinen ratkaisu. Taulukossa 1. on vertailtu eri jarrutusmenetelmiä jarrutustehon  $P$ ,

vaihevirran harmonisten  $I_{vn}$ , tehokertoimen  $\cos\varphi$ , verkkokatkosten kestävyys ja laitteiston hinnan mukaan.

Taulukko 3.1 Jarrutusmenetelmien vertailutaulukko

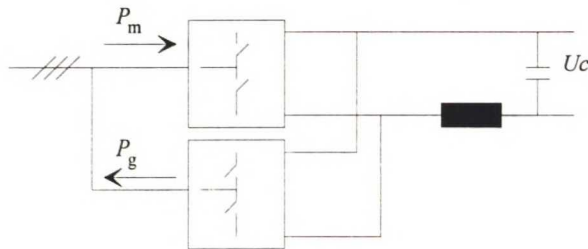
	$P$ , pieni	$P$ , suuri	$I_{vn}$	$\cos\varphi$	verkkokatkos	hinta
vastusjarrutus	+	-	+	+	+	+
pakkokomm. vs.	+	$\pm$	+	+	+	-
verkkokomm. vs.	$\pm$	+	-	-	-	+

Tulevaisuudessa suuntaus on pakkokommutoituihin vaihtosuuntaajiin. Tämä johtuu siitä, että verkossa olevien laitteiden verkkoon aiheuttamien häiriöiden rajoitukset ja määräykset tulevat kiristymään.

#### 4. Jarrutusmenetelmän valinta

Tässä työssä keskitytään tutkimaan keskitehoisen (250...2500 kVA) systeemikäytön verkkoonjarrutusta. Kyseessä on tasajännitevälipiirillä varustettu käyttöryhmä, joka koostuu useista taajuusmuuttajista. Jarrutuksessa tullaan käyttämään verkkokommutoivia tyristoreita. Jarrutuslaitteiston tulee sopia olemassaoleviin käyttöryhmiin SAMI STAR ja ACV 700.

Tutkittaessa jarrutusmenetelmiä on otettava tarkastelun kohteeksi koko sähkökäytön tehonsyöttöperiaate. Tähän kuuluu sekä tasasuuntaus toimittaessa moottorisillalla että vaihtosuuntaus toimittaessa generaattorisillalla.



Kuva 4.1 Verkkoyksikön periaate

Kuvassa 4.1 on esitetty verkkoyksikön periaate. Ylempi silloista on tasasuuntaussilta (moottorisilta) ja alempi on vaihtosuuntaussilta (generaattorisilta). Tasasuuntaukseen on edullista käyttää diodeja, koska niiden vaikutukset verkon tehokertoimeen ovat pienet. Lisäksi diodisilta ei tarvitse ohjauspulsseja. Yleisesti käytetään kuitenkin tyristoreita moottorisillassa.

Generaattorisillassa tarvitaan aina ohjattavat komponentit. Systeemikäytöissä on valinta tehtävä GTO:n ja verkkokommutoivan tyristorin välillä. Mikäli käytetään GTO:ta, tarvitaan koko yksikölle monimutkainen ja kallis ohjausjärjestelmä

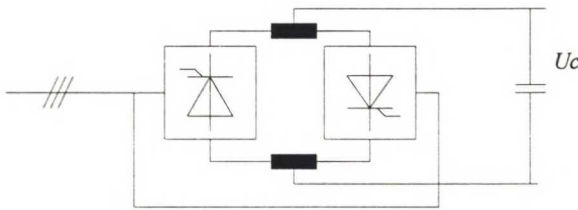


sekä verkkokuristin. Tavallisella tyristorilla toteutettuna ohjaus on yksinkertainen ja varsin edullinen.

Ohjaavan komponentin lisäksi, voidaan verkkoyksiköt jakaa kiertovirrallisiin ja -virrattomiin järjestelmiin. Kiertovirtaa käytetään varsinkin DC-käytöissä aukottuvan virran aiheuttamien säätötekniisten ongelmien pienentämiseksi.

#### 4.1 Kiertovirrallinen vastarinnankytketty tyristorisilta

Virran aukottumisen estämiseksi lisätään kuristin siltojen välille ja molempia siltoja ohjataan samanaikaisesti. Pienillä moottori- ja generaattorikuormilla virta saadaan jatkuvaksi. Säädöstä tulee stabiili, eikä DC-jännite juuri heilahtelee.



Kuva 4.2 Kiertovirrallinen vastarinnan kytketty tyristorisilta

Tasajännite on molemmilla silloilla sama mutta vastakkaismerkkinen. Tästä seuraa, että tyristorien sytytyskulman täytyy täyttää ehto /23/

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1 \quad (4.1)$$

jossa

- $\alpha_1$  on moottorisillan sytytyskulma
- $\alpha_2$  on generaattorisillan sytytyskulma

Vaikka kummankin sillan tasajännitteen keskiarvo on sama

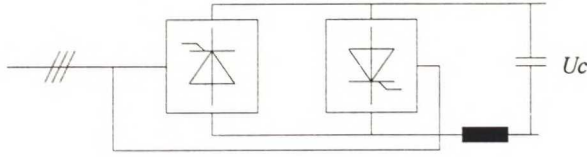
$$U_{di} \cos \alpha_2 = U_{di} \cos(\pi - \alpha_1) \quad (4.2)$$

niiden hetkellisarvoissa on eroja ( $U_{di}$  on tasajännite kulmalla  $\alpha_1 = 0$ ). Hetkellisarvojen erot saavat aikaan kiertävän virran siltojen välillä.

#### 4.2 Kiertovirraton vastarinnankytketty tyristorisilta

Silloilla on yhteinen tasoituskuristin. Siltoja ohjataan yhtä kerrallaan. Välipiirin jännitteen säätö on hankalaa, koska sillan käyttäytyminen vaihtelee kuormituksen mukaan. Aukottuvan virran säätöä on selvitetty mm. viitteissä /22, 24/.





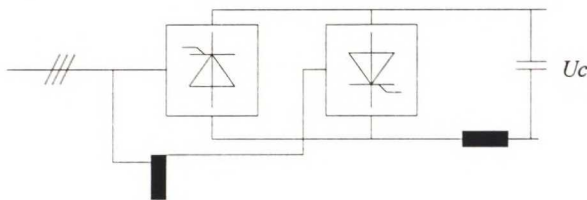
Kuva 4.3 Vastarinnan kytketty tyristorisilta

Tyristorisillan käytöstä jännitevälipiirillä varustetuissa systeemikäytöissä aiheutuu eräs merkittävä ongelma: Jarrutuksen aikana täytyy välipiirin jännitteen olla riittävän alhainen suhteessa verkon jännitteeseen, jotta generaattorisillan tyristorit saadaan luotettavasti sammumaan. Tämä tarkoittaa sitä, että välipiirin jännite on laskettava jarrutuksen ajaksi 85...90%:iin nimellisestä, jotta kommutointi onnistuu.

Jos verkkoonjarrutuksen aikana yksi tai useita käyttäjiä toimii moottoripuolella, ei näiden moottoreille saada täyttä jännitettä eikä näinollen nimellistä momenttia.

#### 4.2.1 Muuntaja generaattorisillalla

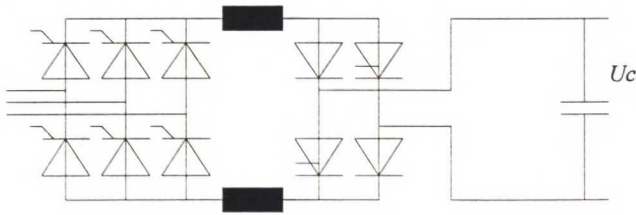
Kun generaattorisillalle lisätään nostomuuntaja, voidaan välipiirin jännite pitää nimellisenä jarrutuksenkin aikana [2]. Sillan vaihtojännitteen kasvaminen pienentää kommutointiaikaa. Toisaalta muuntajan oikosulkuinduktanssi lisää kommutoimisaikaa. Muuntaja voi olla säästökytketty (kuva 4.4), mikä on huomattavasti halvempi kuin tavallinen muuntaja. Säästökytketyn muuntajan oikosulkuimpedanssi on 1.5...2.5%, kun se vastaavantehoisella erotetulla muuntajalla on 6...7%.



Kuva 4.4 Säästömuuntaja generaattorisillalla

#### 4.3 Yksi silta ja suunnanvaihtokytkin

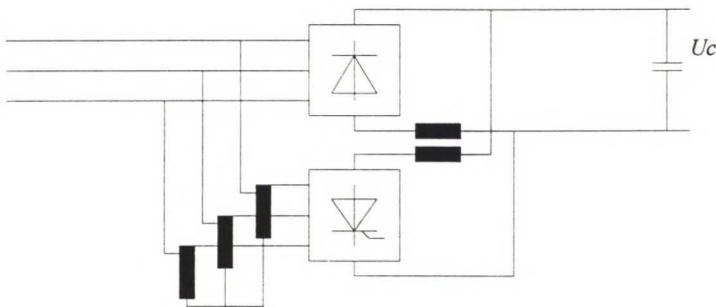
Suurissa yksittäiskäytöissä (ABB, MEGASTAR) vaihdetaan tyristorisillan napaisuus GTO-kytkimillä. Näin voidaan samaa siltaa käyttää sekä moottori- että generaattorisiltana (kuva 4.5). Kytkinkomponenttien määrä vähenee, mutta GTO-kytkimien täytyy jarrutuksen aikana kestää suuri jatkuva teho. Vastaava kytkentä pienemmille tehoille on esitetty viitteessä [7].



Kuva 4.5 Suunnanvaihto GTO-kytkimillä

#### 4.4 Vastarinnankytketty diodi/tyristorisilta ja nostomuuntaja

Tässä työssä tutkitaan mahdollisuutta käyttää moottorisiltaa ohjaamatonta diodisiltaa ja generaattorisiltaa tavallista tyristorisiltaa (kuva 4.6). Periaate muistuttaa kiertovirrallista järjestelmää, koska joka sytytyksellä kaksi vaihetta oikosulkeutuu DC-kuristimen kautta.

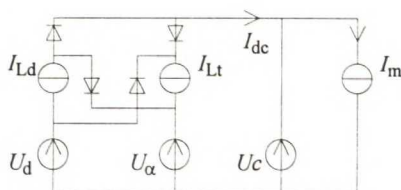


Kuva 4.6 Vastarinnankytketty diodi-/tyristorisilta

Yo. muistuttava vastarinnankytketty diodi-/tyristorisilta on esitelty viitteessä /17/.

Koska muuntajan avulla nostetaan generaattorisillan jännitettä, voidaan jarrutuksessa välipiirin jännite pitää nimellisenä. Diodisillan etu tyristorisiltaan verrattuna on parempi verkon tehokerroin toimittaessa moottorisillalla. Lisäksi diodi on suurilla tehoilla huomattavasti halvempi kuin tyristori, eikä se tarvitse ohjauspiirejä. Sillanvaihtologiikka on varsin yksinkertainen, koska diodisilta johtaa aina, kun sen jännite on suurempi kuin välipiirin jännite.

Tyristorisiltaa voidaan ohjata koko ajan pienellä sytytyskulmalla, jolloin äkillisiin kuormitusmuutoksiin (moottori → generaattori) saadaan nopea, automaattinen vaste. Jatkuva ohjaus on kuitenkin vaarallista, mikäli verkossa esiintyy katkoksia, koska tyristoreita ei saada sammumaan ilman verkon vastajännitettä.



Kuva 4.7 Kytkenän periaatteelliset sähkölähteet

Kun diodisilta, tyristorisilta ja välipiirin kapasitanssi (kuva 4.7) korvataan jännitelähteillä ( $U_d$ ,  $U_\alpha$  ja  $U_c$ ) sekä kuristimet ja moottori virtalähteillä ( $I_{Lt}$ ,  $I_{Ld}$ ,  $I_m$ ), voidaan todeta, että kytkeä täyttää nk. resiprookkiehdon: virtalähteitä ei saa kytkeä sarjaan, jännitelähteitä ei saa kytkeä rinnan.

#### 4.4.1 Diodisilta

Diodisilta on ohjaamaton 6-pulssisilta. Sillan positiivisella puolella johtaa diodi, jonka vaihejännite on positiivisin. Vastaavasti negatiivisella puolella johtaa diodi, jonka vaihejännite on negatiivisin. Sillassa johtaa samanaikaisesti vähintään kaksi diodia, silloin kun diodisillan jännite on suurempi kuin välipiirin jännite. Diodisillalla tapahtuu kommutointi vastaavalla tavalla kuin tyristorisillalla.

Diodisillan kommutointi ei ole sillalle itselleen ja sen toiminnalle ongelmallinen. Kommutointi aiheuttaa kuitenkin verkon jännitteisiin säröytymistä, kommutointilovia, jotka saataavat olla haitallisia muille samassa verkossa oleville laitteille.

#### 4.4.2 Tyristorisilta

Tyristorisilta on ohjattu 6-pulssisilta. Tyristori liipaistetaan johtavaksi hilapulssilla ja se sammuu, kun virta on pienempi kuin pitovirta. Koska piirissä on nostomuuntaja, täytyy tyristorien jännitekestoisuus mitoittaa suuremmaksi kuin verkon jännite.

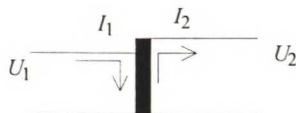
Tavallisen tyristorisillan kommutointeja ja vastarinnan kytketyn diodi-/tyristorisillan kommutointeja on analysoitu jäljempänä.

#### 4.4.3 Säästömuuntaja

Kun muuntaja rakennetaan säästökytkentäiseksi, saavutetaan huomattava materiaalin säästö /9, 15, 21/. Muuntajassa sama käämi toimii sekä ensiö- että toisiokääminä. Ensiö- ja toisiokäämin yhteisessä osassa kulkeva virta on  $I_z$

$$\bar{I}_z = \bar{I}_1 - \bar{I}_2 \quad (4.3)$$

Tämä käämin osa voidaan mitoittaa erotusvirran  $I_z$  mukaan, joka pienentää materiaalin menekkiä.



Kuva 4.8 Säästökytketty muuntaja



Verrattaessa samantehoisen normaalirakenteisen ja säästökytketyn muuntajan kuparin painoja, saadaan

$$G_s = \frac{N_2 - N_1}{N_2} G_n \quad (4.4)$$

jossa

$G_s$	säästömuuntajan kuparin paino
$G_n$	normaali muuntajan kuparin paino
$N_1$	ensiön käämikierrokset
$N_2$	toision käämikierrokset

Jos toisiojännite on 20% suurempi kuin ensiojännite, on painosuhte

$$G_s = 0.17 G_n \quad (4.5)$$

Säästömuuntajan kuparimäärä on vain 17% vastaavan normaalimuuntajan kuparimäärästä.

Säästömuuntajan heikkoutena on galvaaninen yhteys ensiön ja toision välillä. Yläjännitekäämiin tuleva vika voi aiheuttaa vaarallisen jännitteen alajännitekäämiin. VDE-standardin mukaan sallitaan vain 25%:n ero ensiön ja toision välillä, mikäli jännite maata vasten on suurempi kuin 250 V.

Tyristorisilta vaikuttaa säästömuuntajan mitoittamiseen samalla tavalla kuin syöttömuuntajan mitoittamiseenkin. Yliaaltojen vaikutus täytyy huomioida /26/. Otetaan esimerkiksi syöttöyksikkö, jonka nimellinen tasasuuntausteho on 315 kVA ja verkon jännite 500 V. Mitoitetaan syöttöyksikön säästömuuntaja olettamalla tasasuuntausteho ja vaihtosuuntausteho yhtä suuriksi. Näin ei välttämättä ole, koska jarrutusteho on yleensä pienempi ja jarrutusaika suhteellisen lyhyt (syklinen käyttö). Mitoitus tapahtuu seuraavasti.

$$S_N = U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad \text{muuntajan nimellisteho} \quad (4.6)$$

$$S_T = S_N \left( 1 - \frac{U_2}{U_1} \right) \quad \text{säästömuuntajan tyypiteho} \quad (4.7)$$

Syöttöyksikön nimellinen verkkovirta

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U} = \frac{315 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 500 \text{ V}} = 364 \text{ A} \quad (4.8)$$

Jarrutuksessa välipiiristä syötetään sama virta. Kun muuntajan muuntosuhde on 1.2, on muuntajan nimellisteho (4.6)

$$S_{Nm} = \mu U_1 I_2 = 1.2 \cdot 500 \text{ V} \cdot \sqrt{3} \cdot 364 \text{ A} = 378 \text{ kVA} \quad (4.9)$$



Muuntajan tyyppiteho (alaindeksit valitaan niin, että  $U_2/U_1 < 1$ )

$$S_{Tm} = S_{Nm} \left( 1 - \frac{U_1}{\mu U_1} \right) = 378 \text{ kVA} \cdot \left( 1 - \frac{1}{1.2} \right) = 63 \text{ kVA} \quad (4.10)$$

Muuntajan mitoituksessa on otettava lisäksi huomioon tyristorisillan aiheuttamat yliaaltovirrat ja siltojen välinen kiertovirta. Muuntajan nimellisteho on valittava siten, että kuormitushäviöt suuntaajakäytössä eivät ylitä kuormitushäviöitä muuntajan sinimuotoisella nimellisvirralla  $I_N$ . Koska kuormitushäviöt ovat verrannolliset kuormitusvirran  $I$  neliöön, mainittu ehto toteutuu, kun /26/

$$\frac{I}{I_N} \leq \sqrt{\frac{1 + a_1}{1 + a_1 \frac{1}{i_{rms}^2} \sum_{n=1} i_n^2 \cdot n^2}} \quad (4.11)$$

jossa

- |           |   |
|-----------|---|
| $a_1$     | lisähäviökerroin  |
| $i_{rms}$ | virran suhteellinen tehollisarvo perusaallon tehollisarvoon nähden ( $>1$ ) |
| $i_n$     | $n$ :nnen yliaallon tehollisarvo suhdelukuna virran tehollisarvosta         |
| $n$       | yliaallon kertaluku (1, 2, 3, 4, ...)                                       |

Lisähäviökerroin  $a_1$  kuvaa virran yliaaltojen aiheuttamia suhteellisia kuormitushäviöitä muuntajan kokonaiskuormitushäviöistä (käämin tasavirtahäviöt/pyörrevirtahäviöt). Kuten jäljempänä ilmenee, vaihevirroissa on varsin suuria yliaaltokomponentteja. Nämä on otettava huomioon sekä säästömuuntajan että syöttömuuntajan mitoituksessa. Liitteessä 2. on esitetty jakelumuntajille tyypillisiä  $a_1$ :n arvoja ja lisäksi tyypillisiä kuormitettavuuskäyriä tasavirtakäytössä.

Suuntaajalaitteisiin liittyy toisinaan myös kuormitusvirran tai syöttöjännitteen tasakomponentti, jonka johdosta magnetointivirta ja -häviöt kasvavat voimakkaasti. Kuormitusvirtaan tasakomponentti syntyy

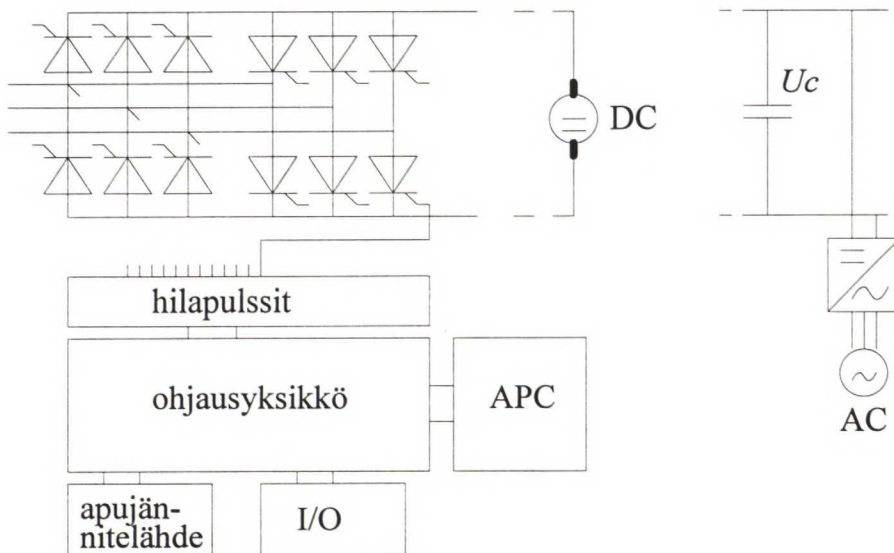
- puolialtotasasuuntauksessa
- puoliohjatulla tyristorisilloilla
- tyristorien ohjauskulmavirheistä

Tutkittavassa laitteistossa tasakomponentti syntyy siitä, että säästömuuntajan virtapulssit ovat erilaiset ylähaaran ja alahaaran tyristorin sytytyksissä. Mittausten mukaan /26/ tasakomponentin ollessa 1% toision nimellisvirrasta kasvavat rautahäviöt 4%. Vastaavasti 2% tasakomponentti lisää rautahäviöitä 10%, mitä on pidettävä sallitun tilanteen ylärajana.

## 5. DCV 700 tasavirtakäyttö verkkoonjarrutuksessa

DCV 700 on uusi sarja täysin digitaalisia tasavirtakäyttöjä, jotka on tarkoitettu syöttämään ja ohjaamaan tasavirtamoottoreita. Ohjaavina kytkiminä on verkkokommutoitavat tyristorit. Sillat voidaan kalustaa 2- tai 4-kvadranttisiksi. Samaa ohjauselektroniikkaa käytetään koko laajalla tehoalueella,

- virta-alue 22...5150 A
- jännitealue 380...1000 V<sub>AC</sub>
- tehoalue 11...5220 kW



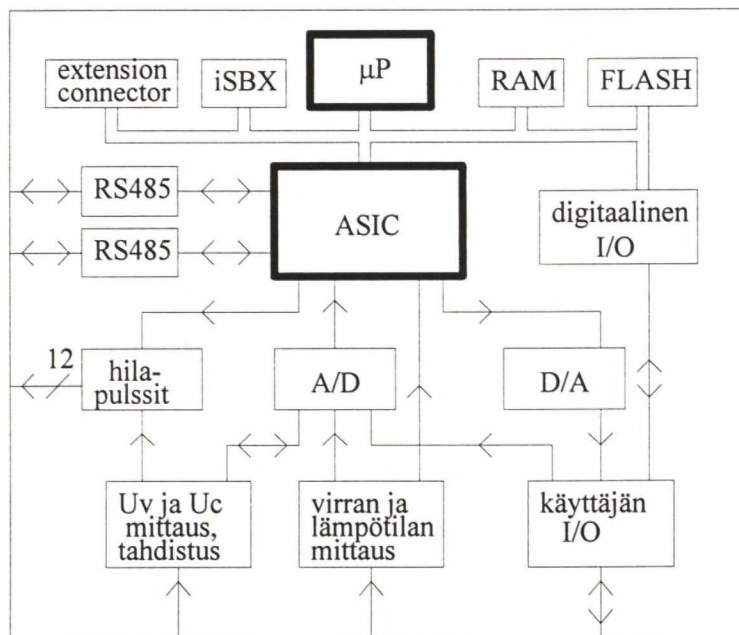
Kuva 5.1 DCV 700

Seuraavassa osassa tarkastellaan uutta DC-käyttöä siltä osin kuin se on merkityksellistä säädetyn vaihtovirtakäytön verkkoonjarrutuksen kannalta. Lähinnä kysymykseen tulevat mittaukset, suojaukset, säätö ja kommunikointi.

DC-käytön yhteensopivuus uuden AC-käytön, ACV 700 kanssa helpottaa soveltamista verkkoonjarrutuskonseptiin.

- sama sovellusohjain (APC), vähemmän varaosia
- samat linkit automaatiojärjestelmiin
- samat käyttöönotto-, huolto- ja ohjelmointityökalut
- sama ohjauspaneeli
- yhteneväinen ulkonäkö ja kaapit
- mahdollisuus rakentaa järjestelmiä, joissa on sekä AC- että DC-käyttöjä

Ohjausyksikön (kuva 5.2) ydin on 16-bittinen mikroprosessori. Prosessorin apuna on DC-käytön ohjauksia ja mittauksia varten kehitetty ASIC-piiri. Varsinaiset sovellusohjelmat ovat sovellusohjaimella.



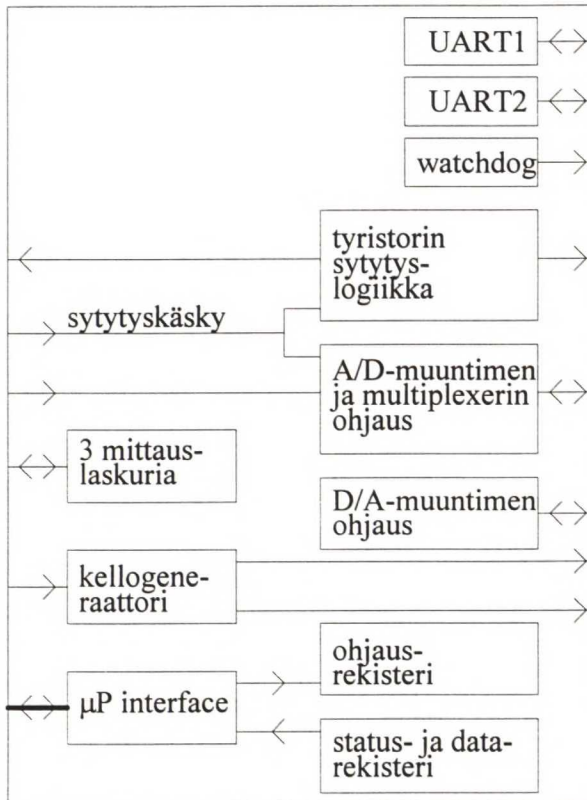
Kuva 5.2 Ohjausyksikön lohkokaavio

## 5.1 DC94 ASIC

DC94 ASIC-piiri on kehitetty hoitamaan vastarinnan kytketyn tyristorisillan mittauksia, ohjauksia ja kommunikointia. Piiri voi generoida useita erilaisia hilapuls-sijonoja. Piiri sisältää kaikki tarvittavat mittauksen ohjaukset. Tasajännitevälipiirin verkkoonjarrutuksen kannalta tärkeitä mittauksia ovat

- verkon jännitteen mittaus
- välipiirin tasajännitteen mittaus
- virranmittaus

ASIC-piirin väyläratkaisu on yhteensopiva INTELin 16-bittisen prosessorin kans-sa (kuva 5.3). Useiden rutiinitoimintojen siirtäminen prosessorilta erilliselle piiril-le antaa prosessorille enemmän aikaa suorittaa vaativia laskentaoperaatioita. Toi-saalta DC-käytön ohjauksista ja säädöstä selvittää yksinkertaisemmalla ja hitaam-malla prosessorilla.



Kuva 5.3 ASIC-piirin lohkokaavio

## 5.2 Mittaukset

Yhdellä A/D-muuntimella ja multiplexerillä voidaan digitalisoida useita analogiasignaaleja. ASIC valitsee mitattavat kanavat, käynnistää muunnoksen ja lukee muunnostulokset. Piirin ja muuntimen välinen kommunikointi tapahtuu sarjamuodossa. Mitattavia signaaleja

- |               |                              |
|---------------|------------------------------|
| - IDCpeak     | virran huippuarvo            |
| - IDCave      | virran keskiarvo             |
| - IDCend      | virran loppuarvo             |
| - TEMPerature | jäähdytyselémentin lämpötila |
| - UC          | DC-jännite                   |
| - UN          | verkon jännite               |

Piirillä on kolme laskuria, joita käytetään DC-käytöissä

- DC-virran keskiarvon mittaamiseen U/f-muuntimella
- virran johtoajan mittaamiseen
- reaaliaikalaskurina

Lisäksi piirillä on kaksi sarjaliikennekanavaa (UART), D/A-muuntimen ohjauslogiikka ja WATCHDOG-toiminto.



### 5.2.1 DC-jännitteen mittaus

DC-jännite tuodaan rajoitusvastusten ( $5...10\text{ M}\Omega$ ) ja differentiaalivahvistimien kautta A/D-muuntimelle. Mittauspiirissä on voimakas suodatus, joka johtuu siitä, että tyristorisillalla katkottu jännite ei ole kovin tasaista.

Jännitteen mittauksessa on ongelmallista, että mitataan korkeita jännitteitä suurella tarkkuudella. Koko mittausketjussa (rajoitusvastukset, differentiaalivahvistin, A/D-muunnin) 2%:n epätarkkuus saattaa aiheuttaa  $\pm 20\text{ V}$  virheen, kun DC-jännite on  $1000\text{ V}$ . Lisäksi mittauspiirin suodatus vaikeuttaa toimintaa nopeissa muutostilanteissa. Jännitteenmittaus siirretään tyristorisillalta suoraan välipiirin kiskoihin.

### 5.2.2 Verkon jännitteen mittaus

Kolmivaiheverkon jännitteet tuodaan rajoitusvastusten ( $5...10\text{ M}\Omega$ ) kautta differentiaalivahvistimille ja tasasuunnattuna A/D-muuntimelle. Mittauspiiriin on lisätty voimakas suoto, jotta kuormituksesta aiheutuvat jännitteen vääristymät ja kommutointilovet voidaan kompensoida.

Uudessa verkkoonjarrutuskonseptissa jännite mitataan säästömuuntajan toisista. Säästömuuntajan tähtipisteen kytkentä vaikuttaa toisiojännitteiden säröytymiseen.

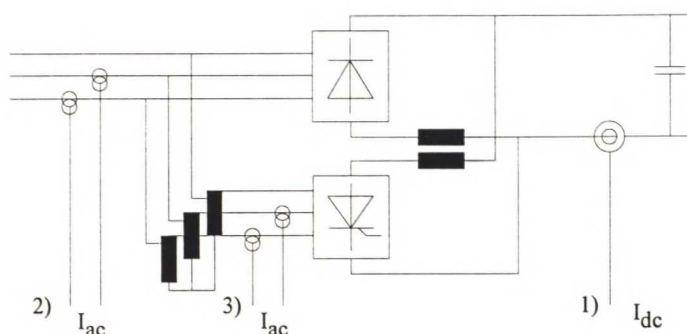
Mittaussignaalin suodatus tarvitaan, jotta kommutointilovet eivät aiheuta turhia verkkokatkoshälytyksiä. Suodatuksen täytyy kuitenkin olla niin pieni, että verkon vikatilanteet pystytään indikoimaan riittävän nopeasti.

### 5.2.3 Virran mittaus

DCV-moduleissa mitataan tyristorisillan vaihevirta virtamuuntajilla. Tasasuunnattu virtasignaali viedään U/f-muuntimen kautta laskurille, joka laskee virran keskiarvon  $I_{AVE}$  kahden peräkkäisen sytytyksen väliltä. Virran huippuarvo  $I_{PEAK}$  mitataan A/D-muuntimella.

Virran johtoaikaa aukottuvalla virralla on käytetty hyväksi välipiirin tasajännitteen mittauksessa (mm. SAFUX, ABB:n vanha verkkoonjarrutuslaitteisto). Vastarinnankytketyssä tyristorisillassa sytytyskulman ja johtoajan avulla voidaan laskea tasajännite suhteessa verkon jännitteeseen (aukottuvalla virralla). Näin meneteltäessä ei tarvita erillistä verkon jännitteen ja tasajännitteen mittausta säätöä varten. Menetelmää on yritetty patentoida (Siemens), mutta ainakaan Suomessa patenttia ei ole hyväksytty. Tutkittavassa laitteistossa virtatietoa ei käytetä muuhun kuin tyristorien suojaamiseen.

Verkkoonjarrutuksessa virta voitaisiin periaatteessa mitata kolmesta eri pisteestä (kuva 5.4).



Kuva 5.4 Virranmittauspisteet

1) Mitattaessa välipiirin virtaa saadaan täsmällinen tieto virran suunnasta. Tällöinhän mitataan välipiirin ja siltojen välistä DC-virtaa. Tyristorisillan virran aukottumista on kuitenkin mahdotonta indikoida silloin, kun sillat johtavat samanaikaisesti (kiertovirta). Lisäksi tarvittava DC-virtamuunnin on varsin suurikokoisen ja kallis.

2) Verkon vaihevirta ennen haarautumista kummallekin sillalle voidaan mitata virtamuuntajilla. Muuntajat ovat pienikokoisempia kuin DC-virtamuunnin ja kokonaiskustannukset ovat pienemmät. Tässä mittapisteessä on kuitenkin sama ongelma kuin DC-virran mittaamisessakin; siltojen johtaessa samanaikaisesti ei voida luotettavasti indikoida aukottumista.

3) Tyristorisillan vaihevirran mittaaminen säästömuuntajan toisiosta on luotettavan toiminnan kannalta paras ratkaisu. Tällöin saadaan täsmällinen tieto virran aukottumisesta.

#### 5.2.4 Lämpötilan mittaus

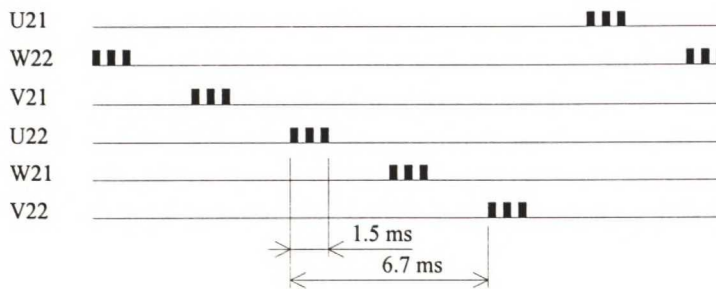
Tyristorisillan jäähdytys-elementissä on PTC-vastus, jolla mitataan elementin lämpötila. Lisäksi voidaan mitata säästömuuntajan lämpötila käämiin kytketyllä PTC-vastuksella. DC94 ASIC-piirissä on analoginen mittauspiiri lämpötilan mittausta varten.

### 5.3 Sytytyspulssien generointi

Piiri voi generoida useita eri pulssimoodeja, joilla erilaisia tyristoreita ja pulssivahvistimia voidaan ohjata. Tyristorit voidaan sytyttää yksittäisellä lyhyellä pulsilla, pitkällä pulssilla tai pulssijonolla yksittäin tai kahden tyristorin pareissa. DCV:ssä käytetään kolmea eri pulssimoodia normaalitoiminnon aikana riippuen käytön tilasta.

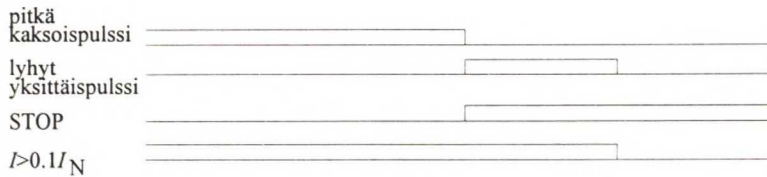
- mikäli verkkojännite puuttuu, ei moduli voi synkronoitua ja näinollen tyristoreille ei anneta minkäänlaisia pulsseja.
- lyhyt yksittäispulssi, kun synkronointi on tapahtunut
- pitkä kaksoispulssi moduloinnin aikana

Mikäli verkkojännite on kytketty (pääkontaktori on kiinni ja moduli tahdistunut verkkoon), mutta modulilla ei ole ajolupaa, annetaan tyristoreille yksittäisiä lyhyitä pulsseja. Sytyttämällä ainoastaan yksi tyristori kerrallaan voidaan varmistua siitä, että virta on varmasti sammunut ennen generaattorisillan sytytysten lopettamista.



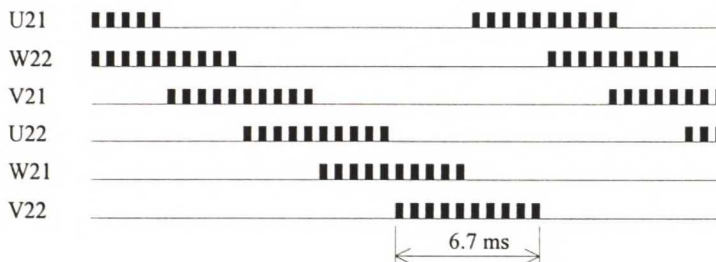
Kuva 5.5 Tyristorin johtoalue 6.7 ms ja yksittäiset lyhyet sytytyspuls-  
sit 1.5 ms

Lyhyttä yksittäispulssia käytetään jarrutusta lopetettaessa. Näin meneteltäessä ei tarvitse erikseen huolehtia virran aukottumisesta.



Kuva 5.6 Lyhyitä yksittäispulsseja jatketaan kunnes virta aukottuu

Normaalissa jarrutustilanteessa annetaan tyristoreille pitkiä kaksoispulsseja, jotka kestävät koko johtojakson ajan ( $120^\circ$ ).



Kuva 5.7 Tyristorien sytytyspuls-  
sit normaalissa jarrutuksessa



## 5.4 Tahdistus verkkoon

Koko järjestelmän synkronointi verkkoon on toiminnan luotettavuuden kannalta ensiarvoisen tärkeää. Synkronointipiirin on pystyttävä erottamaan heikostakin verkosta jännitteen perusaalto ja jännitteen nollanylityspisteet (ZCD, Zero Crossing Detection). Kommutointilovet tai verkon taajuuden hitaat muutokset eivät saa aiheuttaa tahdistuksen häiriintymistä ja väärin ajoitettuja sytytyksiä.

Tahdistus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, joita on selostettu viitteissä /5, 15, 18, 25 /. Kommutointilovien aiheuttamia häiriöitä tahdistuspiireissä on pyritty vähentämään suodatuksella. Suodatus hidastaa kuitenkin synkronointipiirin toimintaa verkon taajuuden muutoksissa. Seuraavia menetelmiä on käytetty synkronointisignaalin häiriöiden pienentämiseksi /5/:

- tahdistusjännitteen mittauspisteen valinta; syöttävän muuntajan ensiö/toisio
- alipäästösuodatin
- kaistanpäästösuodatin
- digitaalinen suodatin (PLL)
- ennakoiva linearisointi
- avoimen silmukan jännitteen aleneman kompensointi
- adaptiivinen aaltomuodon uudelleenkonstruktio (Adaptive Online Waveform Reconstruction)

Yleisimmin käytetään tahdistusmuuntajaa ja vaihelukittua silmukkaa (PLL, Phase Locked Loop). Menetelmän etuna on galvaaninen erotus tahdistuspiirin ja verkon välillä.

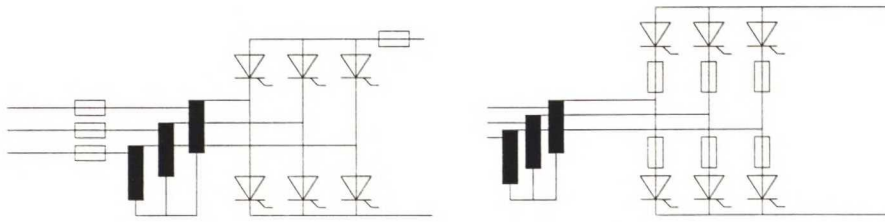
DCV 700-modulissa tahdistus on toteutettu suoralla jännitemittauksella ja suodatuksella. Vaihejännitteet tuodaan pulssivahvistinkortille, jossa ne sovitetaan rajoitusvastuksilla logiikan tasolle. Differentiaalivahvistimilla muodostetaan pääjännitteet ja voimakkaalla suodolla aiheutetaan vaihesiirto jännitteisiin. Vaihesiirto kompensoidaan ohjelmallisesti.

Kytettäessä DCV-moduli säästömuuntajan toisioon on huomattava jännitteiden säröytyminen. Säröytymistä lisää muuntajan yksivaiheinen kuormitus kierto-  
virtojen aikana. Tähtipisteen kytkentä vaikuttaa toisio jännitteiden säröytymiseen, kuten jäljempänä havaitaan.

## 5.5 Suojaukset

DCV 700 sisältää normaalit suojaukset ylivirtaa, -jännitettä, verkon ali-/ylijännitettä ja ylikämpöä vastaan. Tämän lisäksi on ylivirtasuojaus sulakkeilla. Sulakkeet on sijoitettu pienissä moduleissa vaiheisiin verkon ja tyristorisillan väliin. Suurissa moduleissa on tyristorikohtaiset sulakkeet.





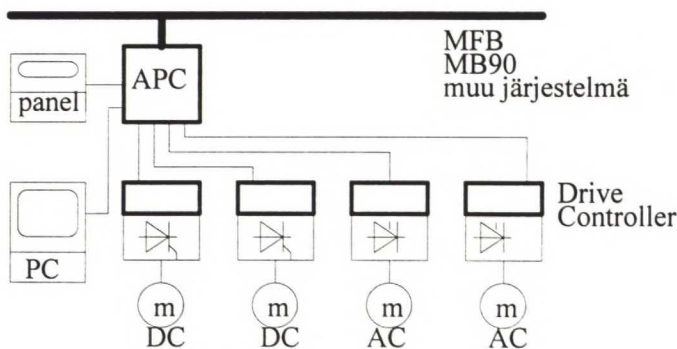
Kuva 5.8 Sulakkeiden sijoitus pienissä ( $I_N < 900 A$ ) ja suurissa ( $I_N \geq 900 A$ ) moduleissa

Sulakesuojaus on tarpeellinen erityisesti verkkokatkostilanteissa. Mikäli siltaa (generaattorisilta) ohjataan verkkokatkoksen sattuessa, ei tyristoreilla ole sammuttavaa vastajännitettä ja silta kippaa. Tapahtuu välipiirin purkautuminen johtavien tyristorien kautta. Ilman sulakkeita tyristorit todennäköisesti tuhoutuvat.

Sulakkeiden palamiselta voidaan välttyä, mikäli tyristorisillan DC-piiriin kytetään DC-katkaisija [11]. DC-katkaisija tutkii koko ajan virran arvoa, ja kun se ylittää raja-arvon katkaistaan virtapiiri. Katkaisija on suhteellisen kallis. Sitä voidaan käyttää optiona, silloin kun verkossa on usein katkoksia.

## 5.6 Kommunikointi

Yksi tärkeä ominaisuus on kommunikointikyky huolto-, ohjelmointi- ja käyttöönottotyökalujen sekä ylemmän tason automaatiojärjestelmän kanssa. DCV:n ohjausyksikkö keskustelee sovellusohjaimen (APC, Application Program Controller) kanssa optokuitujen välityksellä (kuva 5.9). Samaa sovellusohjainta voidaan käyttää sekä DC- että AC-käytön ohjaukseen.



Kuva 5.9 ABB:n AC- ja DC-käyttöjä voidaan ohjata samalla sovellusohjaimella

APC:llä on myös optinen kommunikointilinkki ylemmän tason järjestelmiin; Master Field Bus (ABB), Master Piece 90 (ABB), muu kenttäväyliityntä.

## 5.7 Sääto

Tasavirtakäytön sääto koostuu sisäkkäisistä virta- ja nopeussäätäjistä. Tätä sääto-periaatetta ei voi suoraan soveltaa tasajännitevälipiirin verkkoonjarrutukseen.

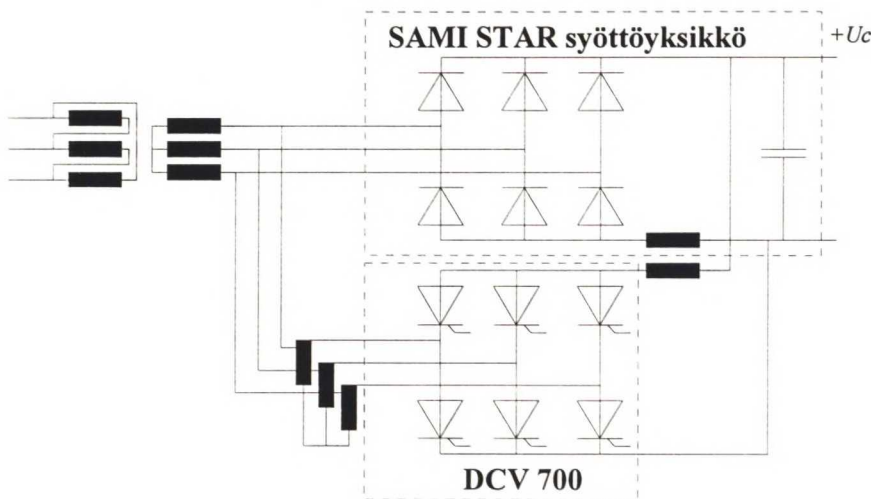
Tasajännitevälipiirin verkkoonjarrutuksessa voidaan säätäjä ohittaa ja syötetään tyristorille vakio sytytyskulmaa. Pitämällä kulma riittävän pienenä pysyy DC-jännite pienempänä kuin invertterien ylijännitelaukaisuraja kovassakin jarrutuksessa. Kun moottorijarrutus loppuu, välipiirin jännite laskee niin alas, että diodisilta alkaa jälleen normaalisti johtaa.

Vakiokulmaohjauksen etuna on yksinkertaisuus. Ei tarvita monimutkaisia säätäjiä eikä säätoalgoritmeja. Lisäksi sillanvaihtologiikka on varsin yksinkertainen: Tyristorisilta voidaan periaatteessa ohjata koko ajan suurella kulmalla eikä välipiirin jännite silti ole lähellä alijännitelaukaisurajaa. Jatkuvalla ohjauksella saadaan nopea vaste dynaamisessa jarrutustilanteessa.

Vakiokulmaohjaus soveltuu säädettyä ohjausta paremmin oikosulkuteholtaan heikkoon verkkoon /25/.

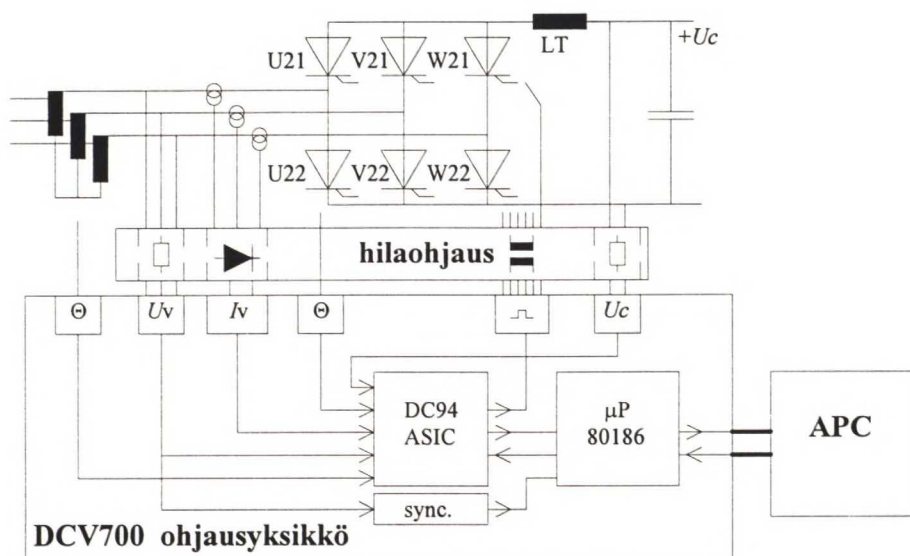
## 5.8 Sovellutus syöttöyksikköön

Uusi syöttöyksikkö rakennetaan siten, että diodisillan rinnalle - olemassaoleva SAMI STARin syöttöyksikkö - kytketään jarrutuslaitteisto. Jarrutuslaitteisto sisältää DCV-modulin (yksisuuntainen tyristorisilta) ja säästömuuntajan. Molemmilla silloilla on oma tasoituskuristin, joka samalla rajoittaa syntyviä kiertovirtoja.



Kuva 5.10 Järjestelmän modulaarinen rakenne

Säästömuuntaja voidaan korvata syöttömuuntajan lisäulosotoilla, mikä on suurilla tehoilla edullisempi ratkaisu kuin erillinen säästömuuntaja. Kuvassa 5.11 on esitetty jarrutusmodulin ohjauksen periaatekaavio mittauksineen.

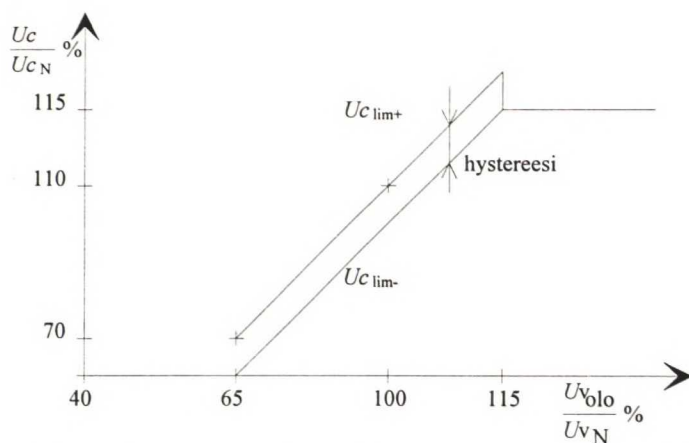


Kuva 5.11 Ohjauksen periaatekaavio

## 6. Ohjauskonsepti ja alkuarvojen määrittäminen

Säädettävänä suureena on välipiirin jännite  $U_c$ . Kun jännite ylittää asetetun raja-arvon  $U_{c\lim+}$  sallitaan tyristorien sytytykset. Kun jarrutuksen aikana välipiirin jännite laskee asetetun rajan  $U_{c\lim-}$  alapuolelle, lopetetaan sytytykset. Asetetut raja-arvot eivät ole vakioita, vaan ne riippuvat verkon jännitteestä  $U_v$ , kuva 6.1.

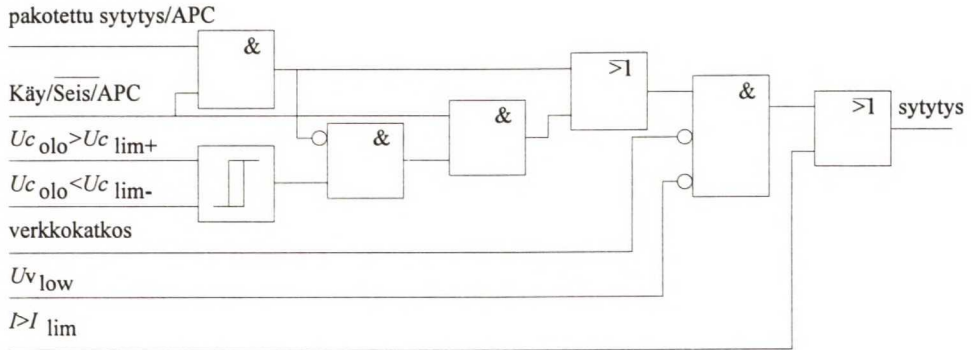
$$U_{c\lim+} = 1.10 \cdot U_{cN} \frac{U_{v_{olo}}}{U_{vN}} \quad (6.1)$$



Kuva 6.1 Verkon jännitteen vaikutus sytytys- ja lopetusrajaan

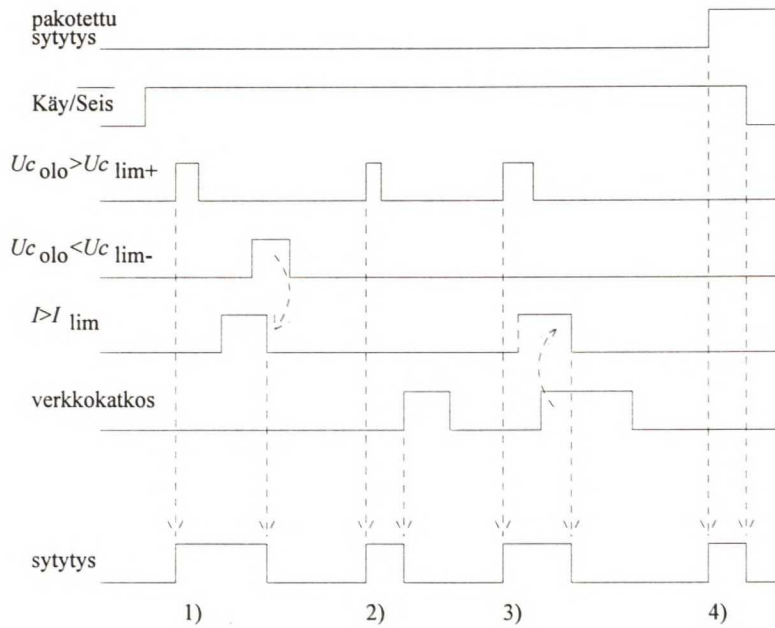
Verkon jännitteen  $U_{v_{olo}}$  ylittäessä 115% nimellisestä  $U_{vN}$ , jarrutetaan tyristöreilla riippumatta välipiirin jännitteen tasosta. Verkon jännitteen alittaessa 65% nimellisestä, estetään tyristorien sytytykset. Verkkokatkos aiheuttaa välittömän sytytyspulssien lopetuksen.

Sovelluskohtaisilla ohjelmilla (APC) voidaan lisäksi asettaa erilaisia ehtoja jarrutukselle, esimerkiksi pakottaa jarrutusmoodi päälle, jolloin voidaan ennakoida tulevaa jarrutustarvetta.



Kuva 6.2 Sytytysten sallintalogiikka

Sytytyksiä ei voida lopettaa tutkimatta virran aukollisuutta. Sytytysten lopetus sallitaan, kun virta on  $\leq 10\%$  nimellisestä. Sama koskee verkkokatkostilanteita. Jäljempänä on selostettu toiminta sytytyspulslien lopetuksesta.



Kuva 6.3 1) normaali toiminta jatkuvalla virralla, 2) verkkokatkos aukollisella virralla, 3) verkkokatkos jatkuvalla virralla ja 4) pakotettu jarrutus

Diodisillan nimellinen DC-jännite kuormitettuna on

$$U_{cN} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_p = 1.35U_p \quad (6.2)$$

jossa  $U_c$  on välipiirin jännite ja  $U_p$  verkon pääjännite.



Kun välipiirin jännite alkaa nousta, diodisilta blokkautuu hetkellä, jolloin

$$U_c = \sqrt{2}U_p \quad (6.3)$$

Sytytykset sallitaan, kun välipiirin jännite ylittää 10% nimellisen jännitteen

$$U_{c\lim+} = 1.10 \cdot U_{cN} = 1.486U_p \quad (6.4)$$

Sytytysraja on

$$\frac{U_{c\lim+}}{U_{p\text{peak}}} = \frac{1.486}{\sqrt{2}} = 105\% \quad (6.5)$$

verkon pääjännitteen huippuarvosta.

Välipiirin jännite jarrutuksen aikana riippuu sytytyskulmasta, verkon jännitteestä, kommutointireaktanssista ja välipiirin (moottoripiirin) virrasta. Kiertovirrattoman, vastarinnankytketyn tyristorisillan välipiirin jännitteelle voidaan kirjoittaa yhtälöt /14/

$$U_c = \frac{3}{\pi} \mu \sqrt{2}U_p \cos \alpha \quad (\text{ei kommutointia}) \quad (6.6)$$

$$U_c = \frac{3}{\pi} (\mu \sqrt{2}U_p \cos \alpha + X_k I_d) \quad (\text{kommutointi}) \quad (6.7)$$

jossa

$X_k$	yhden vaiheen kommutointireaktanssi
$\mu$	säästömuuntajan muuntosuhde
$U_p$	verkon pääjännite
$I_d$	tasavirta (negatiivinen)

Edellä olevat yhtälöt pätevät staattisessa tilassa, kun DC-kuristimen induktanssi  $L$  on ääretön ja kommutointipiirin resistanssi  $R_k$  on nolla. Kiertovirrallisessa vastarinnankytketyssä diodi-/tyristorisillassa välipiirin jännitteeseen vaikuttavat lisäksi kiertovirrat ja latausvirta, kuten jäljempänä havaitaan.

Mikäli välipiirin jännite halutaan pitää tietyissä rajoissa jarrutuksen aikana, täytyy vakiokulman olla parametri, joka riippuu jarrutuspiirin impedansseista ja jarrutustehosta (moottorivirta). Mielestäni sopiva alkuarvo kulmalle on  $155^\circ$ . Vakiokulmaa määritettäessä tärkein kriteeri on kuitenkin riittävä kommutointivara. Kulman täytyy olla niin pieni, että kommutointi onnistuu transienttitilanteissakin

(korkea DC-jännite, verkkojännitteen notkahdus). Viitteessä /22/ on selostettu tutkimustuloksia DC-käytön kommutointivarasta.

Välipiirin jännitteen täytyy jarrutuksen aikana olla riittävän pieni suhteessa tyristorisillan kommutointijännitteeseen, jotta silta ei kippaisi. Mutta toisaalta mitä korkeampana DC-jännite pidetään, sitä pienempiä ovat kiertovirrat. Taulukossa 6.1 on esitetty välipiirin jännitteen arvo suhteessa generaattorisillan jännitteeseen,  $U_{c_g}$  ja moottorisillan jännitteeseen,  $U_{c_m}$ . Jarrutuksen aikana välipiirin jännite pyritään pitämään 87.5...91.7% rajoissa generaattorisillan nimellisjännitteestä.

*Taulukko 6.1 Välipiirin jännite ( $U_{c_m}$ ) % nimellisestä ( $U_{c_{mN}}$ ) ja % nimellisestä generaattorisillan jännitteestä ( $U_{c_{gN}}$ ) muuntosuhteen ollessa 1.2*

$U_{cm}/U_{cmn} \text{ \%}$	$U_{cm}/U_{cgn} \text{ \%}$
115	95.8
114	95.0
113	94.2
112	93.3
111	92.5
110	91.7
109	90.8
108	90.0
107	89.2
106	88.3
105	87.5
104	86.7
103	85.8
102	85.0
101	84.2
100	83.3

Jarrutus lopetetaan, kun välipiirin jännite on pienempi kuin pääjännitteen huippuarvo.

$$U_{c_{lim-}} = \sqrt{2}U_p = \frac{\pi}{3}U_{c_N} = 105\% \quad (6.8)$$

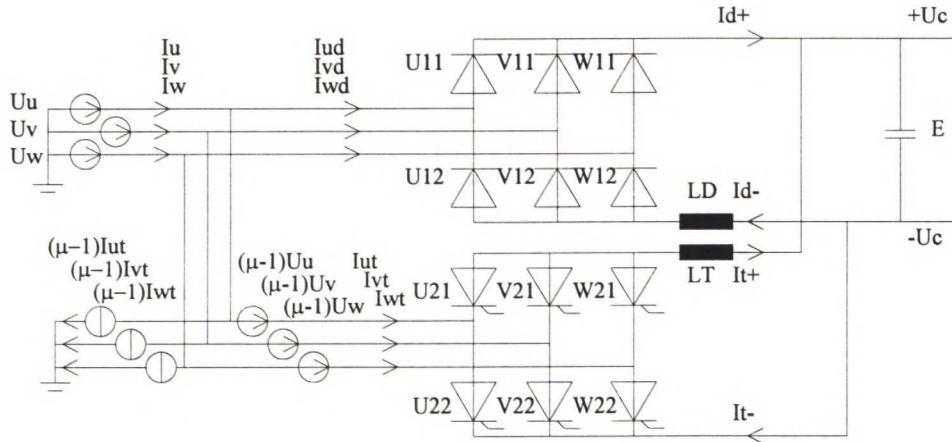
Jarrutusta ei voida lopettaa, mikäli tyristorisillan virta on suurempi kuin 10% sillan nimellisvirta.

$$I_{t_{lim}} = 0.1 \cdot I_{t_N} \quad (6.9)$$

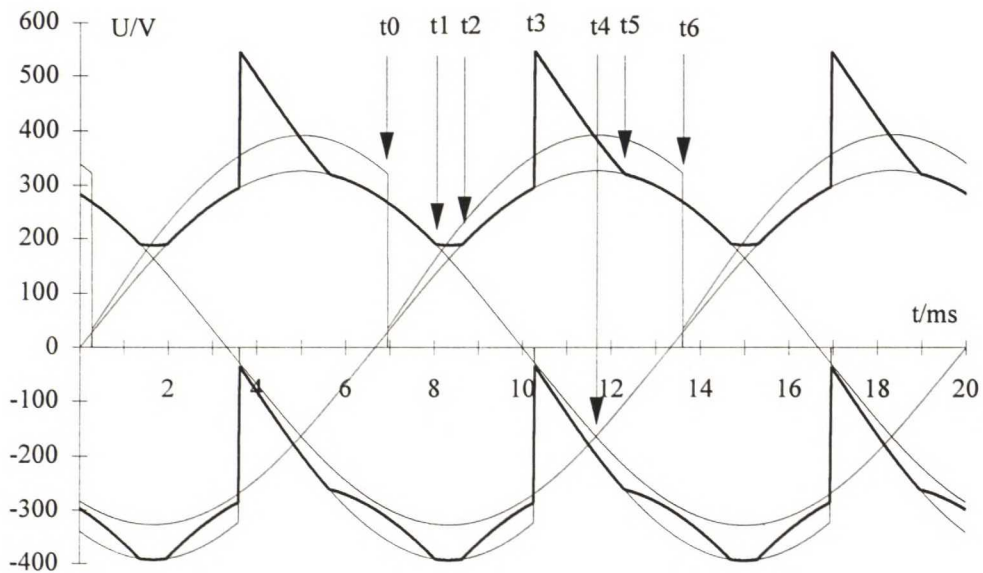
Edellä kuvattuja alustusarvoja ei tämän työn aikana ole testattu dynaamisessa tilassa. Kaikki perustuu teoreettiseen pohdiskeluun. Ei voida sanoa, miten nopeasti DCV pystyy reagoimaan nopeassa jarrutustilanteessa. Joka tapauksessa viive voi olla  $>3 \text{ ms}$  ( $T/6$ ). Tilannetta helpottaa, mikäli välipiirin kondensaattori on suhteellisen suuri. Tällöin tasajännite nousee hitaammin ja DCV-modulille jää enemmän aikaa kytkeä jarrutusmoodi päälle.

## 7. Toiminnan analyysi

Tämä on yksinkertaistettu analyysi vastarinnan kytketyn diodi-/tyristorisillan virroista ja jännitteistä. Kaikki kytkimet oletetaan ideaalisiksi. Piirin hajainduktanssit ja resistanssit oletetaan nolliksi. Välipiirin jännitettä (P-kisko, N-kisko) tarkastellaan syöttömuuntajan tähtipistettä vastaan (nollapotentiaali). Oletetaan lisäksi, että syöttömuuntajan tähtipiste ja säästömuuntajan tähtipiste ovat samassa potentiaalisassa, mutta nollajohtimen virta on niin pieni, ettei sitä huomioida. Syöttömuuntajaa ja säästömuuntajaa käsitellään kolmivaiheisina ideaalisina jännitelähteinä.



Kuva 7.1 Periaatteellinen kytkentä



Kuva 7.2 Simuloidut vaihejännitteet, tyristorisillan korotettu (katkotu) jännite ja DC-kiskojen jännitteet sytytyskulmalla  $\alpha = 155^\circ$

Toimintaa tarkasteltaessa on huomattava, että samanaikaisesti johtaa vähintään kaksi kytkintä. Välipiirin kiskoista toinen on aina johtavan kytkimen potentiaalisassa: P-kisko positiivisimman diodin potentiaalisassa tai N-kisko alahaaran syty-

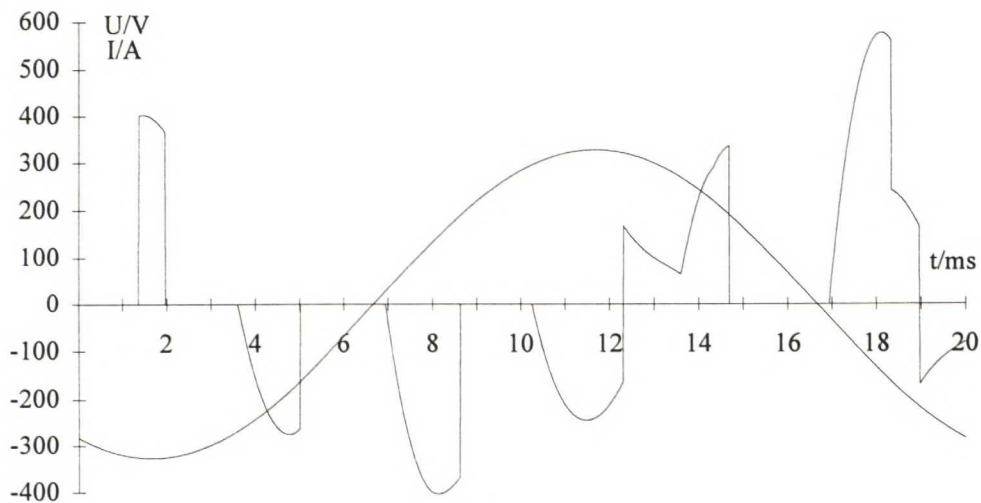
tetyn tyristorin potentiaalissa. Välipiirin DC-kiskot kelluvat siis johtavan kytkimen potentiaalissa. DC-jännitteen taso  $E$  vaikuttaa kytkimien johtoaikoihin, kuten seuraavasta analyysistä ilmenee.

Verkkoonjarrutuksessa voidaan erottaa kolme erilaista toimintatilaa:

- aukollinen kuristinvirta, aukollinen vaihevirta
- jatkuva kuristinvirta, aukollinen vaihevirta
- jatkuva kuristinvirta, jatkuva vaihevirta

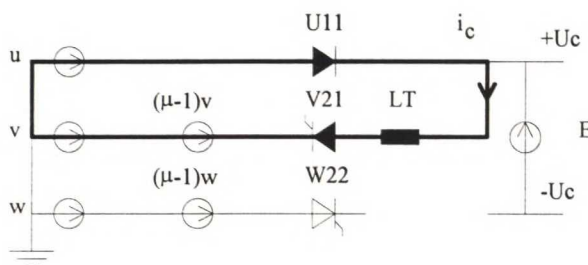
## 7.1 Vaihevirta aukollista

Kuristimen virta ja vaihevirta ovat aukollisia, kun tasajännite on riittävän alhainen ja sytytyskulma on suhteellisen suuri. Liitteessä 1. kuvattua järjestelmää on simuloitu tilanteessa, jossa  $U_c$ -jännite on vakio, 580 V ja sytytyskulma on  $155^\circ$ .



Kuva 7.3 Simuloitu V-vaiheen vaihevirta ja -jännite

Tarkastellaan piirin virtoja, jännitteitä ja sijaiskytkentöjä yhden johtojakson,  $120^\circ$  aikana. Johtojakson aikana sytytetään ylähaaran tyristori ja alahaaran tyristori. Tarkastelussa viitataan kuviin 7.1 ja 7.2 sekä niiden merkintöihin. Tarkastelu aloitetaan sytyttämällä ylähaaran tyristori V21 ja alahaaran tyristori W22.



Kuva 7.4 Virtapiiri ylähaaran tyristorin syttyessä



Kun V-vaiheen ylähaaran tyristori V21 sytytetään, syntyy kiertovirta  $i_c$  U- ja V-vaihteitten välille ja välipiirin P-kisko asettuu U-vaiheen potentiaaliin. U-vaiheen ylähaaran diodi U11 johtaa. Kiertovirran suuruus riippuu sytytyskulmasta ja induktanssista  $L_T$ . Piirin kiertovirralla  $i_c$  saadaan seuraava yhtälö

$$u_u - \mu u_v = L_T \frac{di_c}{dt}$$

$$i_c = \frac{1}{L_T} \int_{t_o}^{t_o+t} (u_u - \mu u_v) dt$$

$$i_c = \frac{1}{L_T} \int_{t_o}^{t_o+t} \left( \hat{u}_v \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \mu \hat{u}_v \sin \omega t \right) dt$$

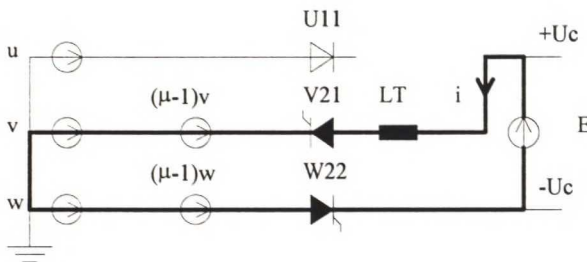
$$i_c = \frac{\hat{u}_v}{\omega L_T} \int_{t_o}^{t_o+t} \left( -\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \mu \cos \omega t \right) dt \quad (7.1)$$

Oletetaan, että kuristimen virta on nolla sytytyshetkellä  $t_o$  (kulma  $\alpha$ ).

W-vaiheen alahaaran tyristori W22 ei johda kiertovirran alussa. Näinollen välipiirin kondensaattoria ei pureta verkkoon. Alahaaran tyristori syttyy ajanhetkellä  $t_1$ , kun

$$-U_c = (u_u - E) < \mu u_w \quad (7.2)$$

Tällöin diodin U11 virta siirtyy tyristorille W22 ja virtapiiri on kuvan 7.5 mukainen.



Kuva 7.5 Kuristimen virta on siirtynyt diodilta tyristorille W22

Vasta tyristorin W22 sytyttyä alkaa virta kulkea välipiirin kondensaattorin kautta ja energia siirtyy välipiiristä verkkoon. Piirin virta noudattaa yhtälöä

$$i = \frac{1}{L_T} \int_{t_1}^{t_1+t} [E - \mu(u_v - u_w)] dt$$

$$i = \frac{1}{L_T} \int_{t_1}^{t_1+t} \left[ E - \mu \hat{u}_w \left( \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin \omega t \right) \right] dt$$

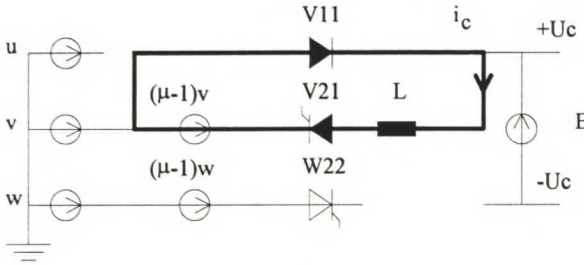
$$i = \frac{1}{\omega L_T} \int_{t_1}^{t_1+t} \left[ E \omega t - \mu \hat{u}_w \left( -\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos \omega t \right) \right] + i_1 \quad (7.3)$$

Virta siirtyy välipiiriin ajanhetkellä  $t_1$ , ja kuristimella on alkuvirta  $i_1$ .

Alahaaran tyristori johtaa niin kauan, kunnes positiivisin diodi V11 alkaa jälleen johtaa.

$$+U_c = (\mu u_w + E) < u_v \quad (7.4)$$

Tyristori W22 sammuu ja kuristimen virta  $i_2$  siirtyy ylähaaran diodille V11 ajanhetkellä  $t_2$ . Syntyy kiertovirta saman vaiheen sisällä.



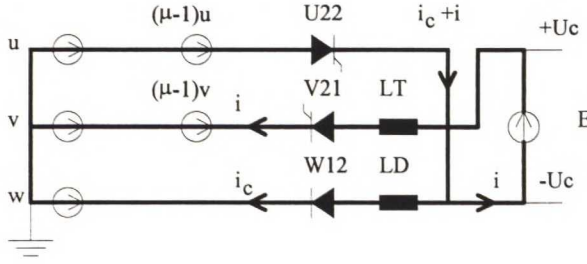
Kuva 7.6 Kiertovirta alahaaran tyristorin sammuesssa

Piirin kiertovirta noudattaa yhtälöä

$$i_c = \frac{1}{L_T} \int_{t_2}^{t_2+t} [(\mu - 1) \hat{u}_v \sin \omega t] dt$$

$$i_c = \frac{1}{\omega L_T} \int_{t_2}^{t_2+t} -(\mu - 1) \hat{u}_v \cos \omega t + i_2 \quad (7.5)$$

Seuraava muutos tapahtuu, kun sytytetään alahaaran tyristori U22 ajanhetkellä  $t_3$ . Sijaiskytkentä poikkeaa jonkin verran ylähaaran tyristorin sytytyksestä, koska kiertovirrat kulkevat diodisillan DC-kuristimen  $L_D$  kautta.



Kuva 7.8 Alahaaran tyristorin U22 sytytys

Kun U-vaiheen alahaaran tyristori U22 sytytetään, on välipiirin N-kisko säästömuuntajan toisiosion potentiaalissa. Tällöin syntyy kiertovirta U- ja W-vaihteitten välille diodisillan DC-kuristimen kautta. Kiertovirta noudattaa vastaavaa yhtälöä kuin ylähaaran tyristorin sytytyksessä (7.1).

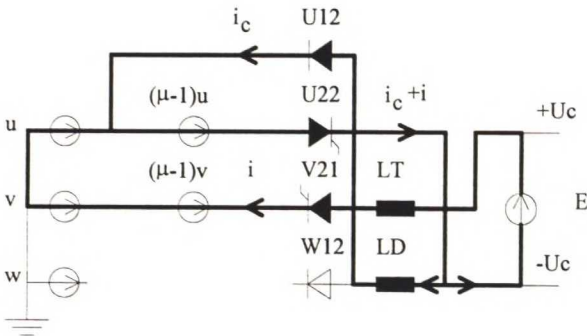
Samaan aikaan johtaa myös ylähaaran tyristori V21. Välipiirin P-kisko on potentiaalissa

$$+U_c = \mu u_u + E > u_v \quad (7.6)$$

joka blokkaa johtovuorossa olevan ylähaaran diodin V11. Tyristorisillan kuristimen virta kulkee koko ajan välipiirin kautta ja energiaa siirretään myös verkkoon. Välipiirin virta noudattaa vastaavaa yhtälöä kuin (7.3).

$$i = \frac{1}{\omega L_T} \int_{t_3}^{t_3+t} \left[ E \omega t - \mu \hat{u}_v \left( \cos \omega t - \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] dt + i_3 \quad (7.7)$$

Seuraava muutos tapahtuu ajanhetkellä  $t_4$ , kun U-vaiheen jännite on negatiivisempi kuin W-vaiheen jännite (kuva 7.8). Kiertovirta siirtyy diodilta W12 diodille U12. Diodisillan kuristimen virta jää kiertämään saman vaiheen sisällä. Kiertovirta noudattaa vastaavaa yhtälöä kuin (7.5). Välipiirin virta noudattaa yhtälöä (7.7).

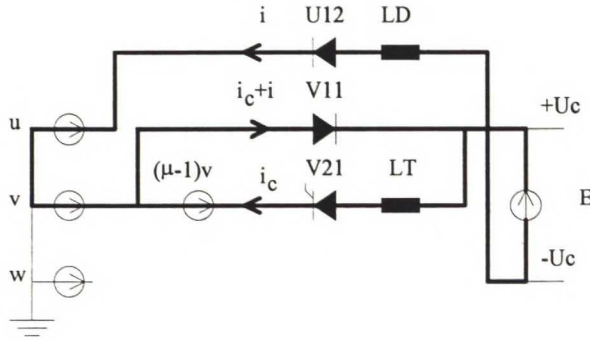


Kuva 7.9 Virran siirtyminen diodilta W12 diodille U12

Johtojakson lopussa ajanhetkellä  $t_5$  syntyy tilanne, jolloin positiivisin diodi, V11 alkaa johtaa (kuva 7.10).

$$+U_c = u_v > \mu u_u + E \quad (7.8)$$

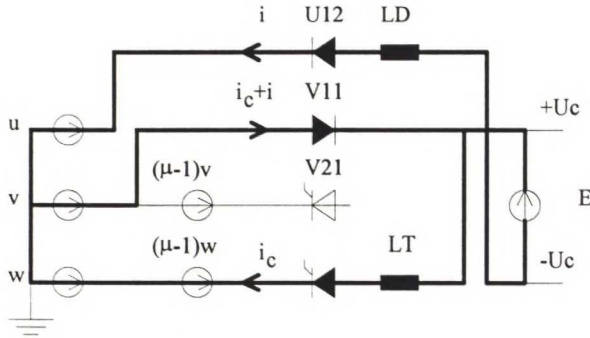
Välipiirin P-kisko on V-vaiheen potentiaalissa ja alahaaran tyristori U22 sammuu. Alahaaran diodi U12 johtaa ja ylähaaran tyristori V21 johtaa.



Kuva 7.10 Virrat alahaaran sytytyksen lopussa

V-vaiheessa kulkee kiertovirran  $i_c$  lisäksi välipiirin latausvirta  $i$ .

Seuraavaksi aloitetaan sama sykli alusta, mutta nyt tyristorisillan kuristimella on alkuvirta  $i_0$ , joka aiheuttaa kiertovirran kasvamisen ylähaaran tyristoria sytytetäessä (kuva 7.11).



Kuva 7.11 Virtapiiri ylähaaran tyristorin sytytyksessä

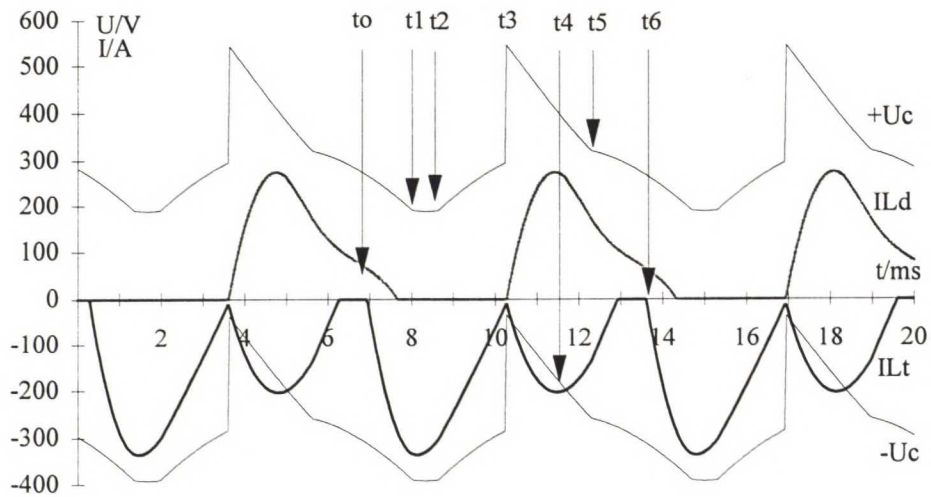
Yhtälö (7.1) saa muodon

$$i_c = \frac{\hat{u}_w}{\omega L_T} \int_{t_0}^{t_0+t} \left( -\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \mu \cos \omega t \right) dt + i_0 \quad (7.9)$$



Kuristimien virrat (diodisillan kuristin  $I_{Ld}$ , tyristorisillan kuristin  $I_{Lt}$ ) voidaan jakaa osiin sen mukaan mitkä kytkimet johtavat (kuva 7.12).

- $t_0 - t_1$  kiertovirta kahden vaiheen välillä ( $I_{Lt}$ ), välipiirin latausvirta ( $I_{Ld}$ )
- $t_1 - t_2$  välipiirin purkausvirta ( $I_{Lt}$ )
- $t_2 - t_3$  kiertovirta saman vaiheen sisällä ( $I_{Lt}$ )
- $t_3 - t_4$  kiertovirta vaiheiden välillä ( $I_{Ld}$ ), välipiirin purkausvirta ( $I_{Lt}$ )
- $t_4 - t_5$  kiertovirta saman vaiheen sisällä ( $I_{Ld}$ ), välipiirin purkausvirta ( $I_{Lt}$ )
- $t_5 - t_6$  kiertovirta saman vaiheen sisällä ( $I_{Lt}$ ), välipiirin latausvirta ( $I_{Ld}$ )

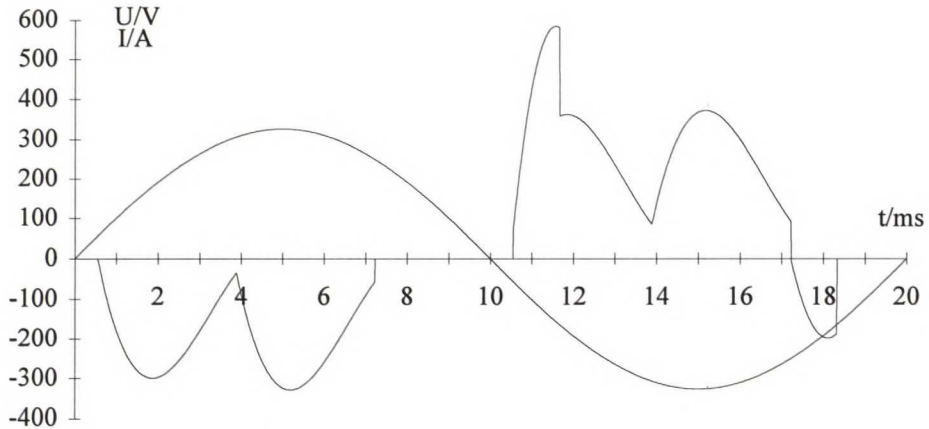


Kuva 7.12 DC-kiskojen potentiaalit ja kuristimien virrat

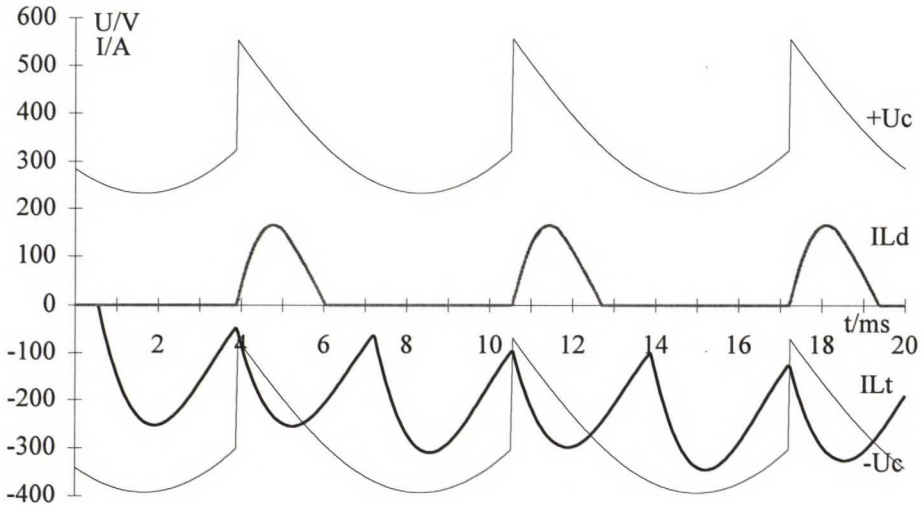
Välipiiriä puretaan verkkoon aikaväleillä  $t_1 - t_2$  ja  $t_3 - t_5$ . Loppu ajasta on joko välipiirin latausvirtaa tai kiertovirtaa kahden vaiheen välillä tai saman vaiheen sisällä. Purkausaika riippuu välipiirin jännitteen tasosta  $E$ . Mitä korkeampi on tasajännite, sitä pidempi on purkausaika (ja tietenkin sitä suurempi jarrutusenergia).

## 7.2 Vaihevirta jatkuvaa

Kun välipiirin jännitettä nostetaan ja sytytyskulmaa kasvatetaan, alkavat kiertovirrat pienentyä. Tyristorisillan kuristimen virrasta ja verkon vaihevirrasta tulee jatkuvaa. Liitteen 1. järjestelmää on simuloitu, kun  $U_c$  on 625 V ja sytytyskulma on  $160^\circ$ .



Kuva 7.13 Simuloitu vaihevirta ja -jännite

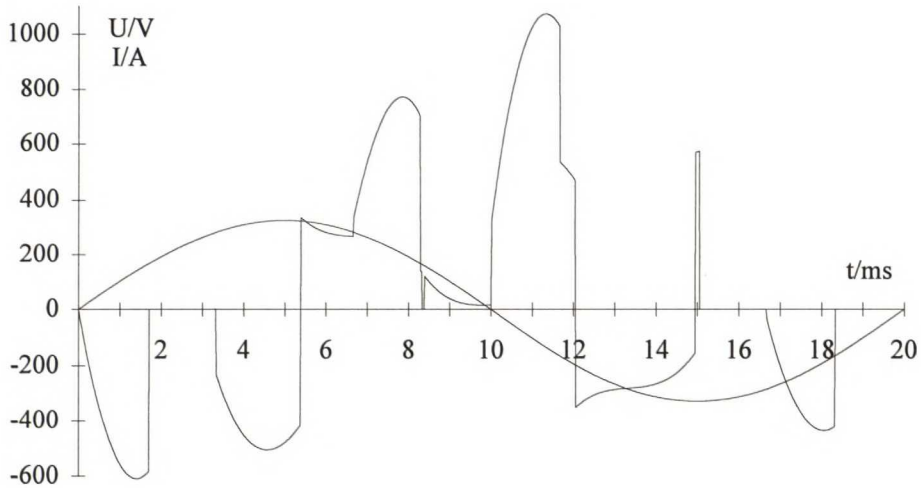


Kuva 7.14 Simuloidut kiskojaännitteet ja kuristimien virrat

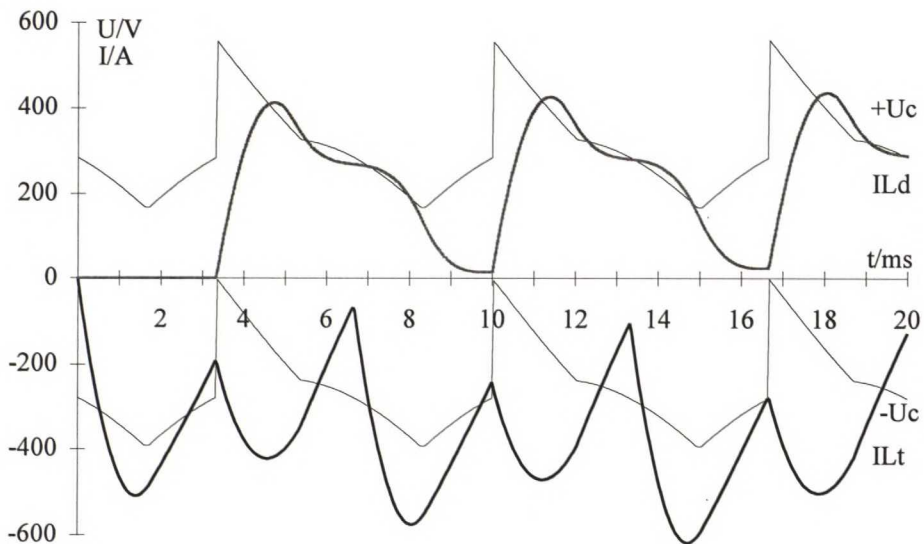
Kuvista voi todeta, että tyristorisillan kuristimen virta  $I_{Lt}$  on jatkuvaa ja vaihevirrassa näkyy jatkuva virtapulssi. Positiivisen puolijakson aikana vaihevirrassa ei näy enää kiertovirtaa. Negatiivisen puolijakson aikana näkyy kaksi kiertovirta-komponenttia.

### 7.3 Kuristimen virta jatkuvaa, vaihevirta aukollista

Kolmas toiminnallinen tila on, kun kuristimen virta on jatkuvaa ja vaihevirta on aukollista. Tilanne syntyy, kun sytytyskulma on pieni ja tasajännite suhteellisen alhainen. Kiertovirrat ovat hyvin suuria. Liitteen 1. laitteistoa on simuloitu, kun  $U_c$  on 560 V ja sytytyskulma on  $150^\circ$ .  $U_c$  on pienempi kuin pääjännitteen huippuarvo, mikä tarkoittaa sitä, että diodisilta ja tyristorisilta syöttävät koko ajan energiaa verkon ja välipiirin välillä edestakaisin.



Kuva 7.15 Simuloitu vaihevirta ja -jännite



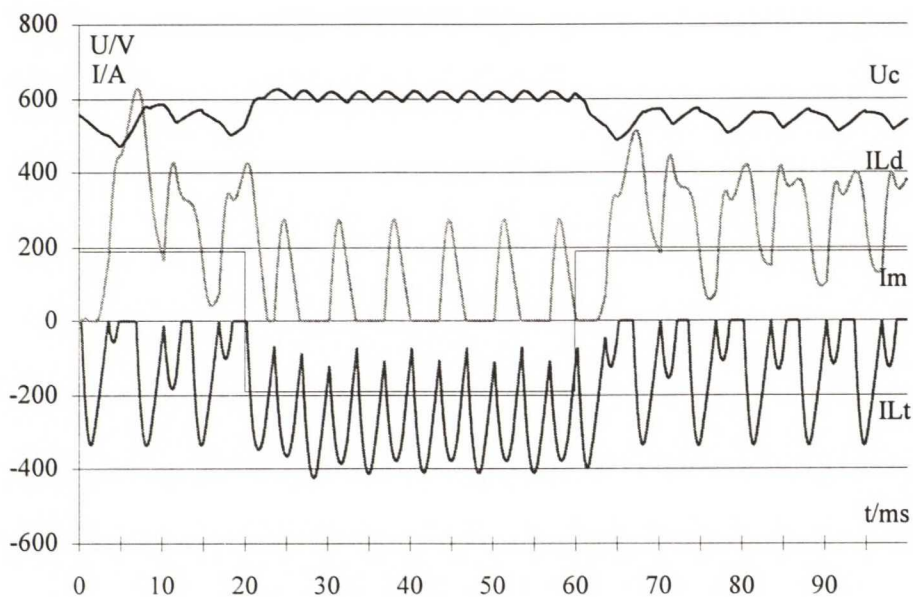
Kuva 7.16 Simuloidut kuristinvirrat ja kiskojännitteet

Kun sytytyskulma on pieni ja  $U_c$  matala, kasvavat kuristimien virrat suuriksi. Molempien kuristimien virta on jatkuvaa. Tällöin saattaa syntyä hallitsematon tilanne; vaihevirta kasvaa niin suureksi, että sulakkeet palavat. Edellä kuvattu tilanne syntyy, kun moottorijarrutus äkisti loppuu, verkkoonjarrutus jatkuu ja väli-

piirin jännite laskee huomattavan alas. Mielestäni tällöin vakiokulma ei voi olla kovin paljon  $152^\circ$  pienempi.

#### 7.4 Askelvaste

Tähän asti on tutkittu laitteiston käyttäytymistä staattisessa tilassa, kun tasajännite ja sytytyskulma ovat vakioita. Käytännön tilanteessa tasajännite  $U_c$  on muuttuja, jonka arvo riippuu diodisillan latausvirrasta, tyristorisillan purkausvirrasta, moottorin virrasta (moottori/generaattori) ja välipiirin kondensaattorin kapasitanssista  $C$ . Seuraavassa on simuloitu liitteen 1. laitteistoa, kun moottorivirta muuttuu askelmaisesti siten, että tasavirta taajuusmuuttajan ja kondensaattorin välillä muuttuu äärettömän nopeasti  $+190$  A:sta  $-190$  A:iin ja 40 ms kuluttua takaisin  $+190$  A:iin. Sytytyskulma on koko ajan vakio  $155^\circ$ .



Kuva 7.17 Simuloidut kuristinvirrat, moottoripiirin virta  $I_m$  ja välipiirin jännite  $U_c$  askelvasteessa

Kuvasta 7.17 voi havaita, että välipiirin jännite ei juuri nouse 600 V:n yli. Toimittaessa moottoripuolella välipiirin jännitteessä on havaittavissa ripple-komponentti. Se aiheutuu suureksi osaksi simulointiohjelman puutteista, sehän ei ota kommutointeja huomioon. Toimittaessa generaattoripuolella havaitaan diodisillalla kiertovirtapulsseja ja vastaavasti toimittaessa moottoripuolella kiertovirrat näkyvät tyristorisillan kuristimen virrassa.

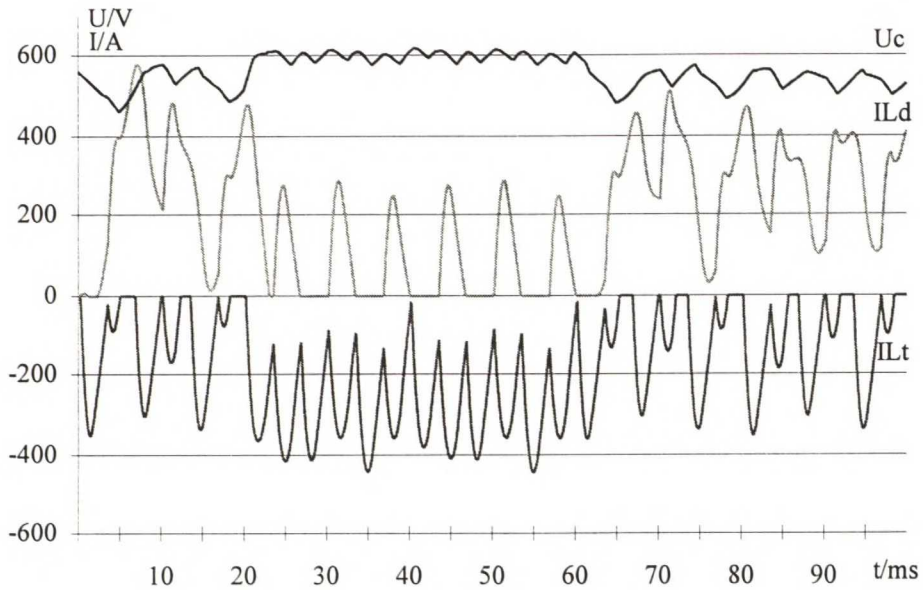
Mielestäni kuva osoittaa, että sillanvaihtoautomaatiikka toimii onnistuneesti. Nopeissakaan suunnanmuutoksissa ei tapahdu yli- tai alijännitelaukauksia. Jatkuvan ohjauksen etu on nopea reagointi muutostilanteissa. Vakiokulman etu taas on stabiili, vakauttava toiminta, silloinkin kun verkon jännitteissä on epäsymmetriaa tai välipiirin virrassa ja jännitteessä on värähtelyä.



## 7.5 Askelvaste epäsymmetrisessä verkossa

Epäsymmetriset vaihejännitteet tai -impedanssit ja vaihesiirto lisäävät taipumusta värähtelyyn [12]. Kun käytetään säädettyä ohjauskulmaa (Individual Phase Control), saattaa säätö vahvistaa värähtelyä.

Liitteessä 1. kuvattua laitteistoa simuloitiin edellisessä kohdassa (7.4) mainitulla askelvasteella. U-vaiheen lähdejännitteeseen tehtiin 5% jännitteen alenema. Simulointitulokset on esitetty kuvassa 7.18.



Kuva 7.18 Simuloitu askelvaste epäsymmetrisessä verkossa

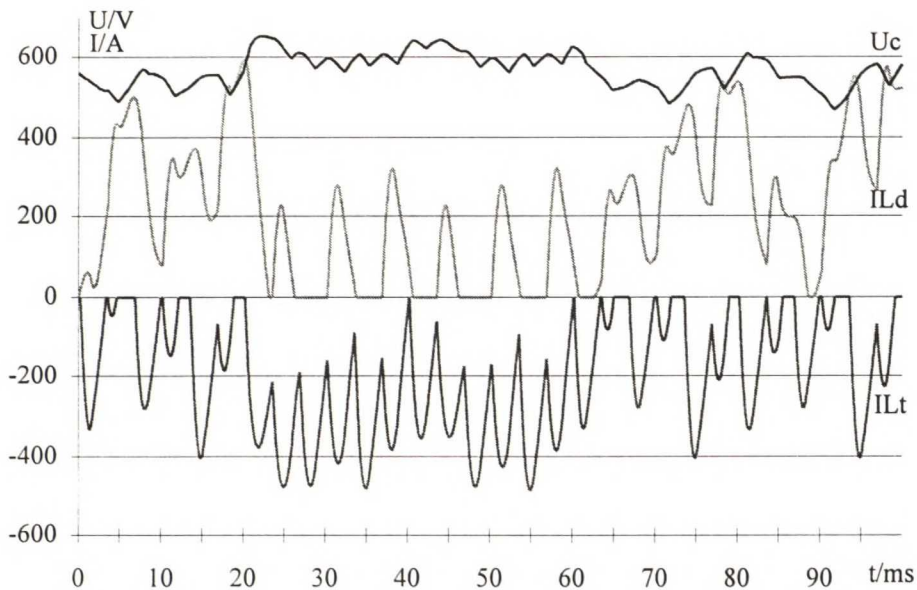
Verrattaessa tulosta kuvan 7.17 vasteeseen voi todeta, että välipiirin jännite ei juuri värähtelee, vaikka yksi vaihejännite on muita pienempi. Tyläistorisillan virrassa on havaittavissa pientä värähtelyä, mutta sekään ei aiheuta ongelmia.

## 7.6 Vaihejännitteen harmonisten vaikutus

Verkkokommutoivan suuntaajan täytyy toimia myös verkossa, jonka jännitteissä on tietty määrä harmonisia yliaaltoja. Jännitteen yliaallot vaikeuttavat säätöä ja aiheuttavat värähtelyä käytettäessä muuttuvaa ohjauskulmaa. Ongelmallisia ovat erityisesti "ei-karakteristiset" parilliset komponentit. Vakiokulmaohjauksen pitäisi vähentää ainakin säädöstä aiheutuvia värähtelyitä. Toisaalta diodisillan ja tyristorisillan väliset kiertovirrat saattavat lisätä epästabiilisuutta.

Liitteen 1. mukaista laitteistoa on simuloitu tilanteessa, jossa vaihejännitteissä  $u_v$  on mukana 2. harmoninen (4 %).

$$u_v = \hat{u}_N(\sin \omega t + 0.04 \sin 2\omega t) \quad (7.10)$$



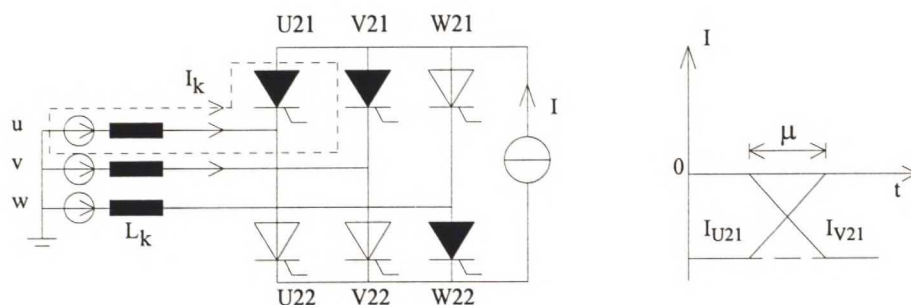
Kuva 7.19 Simuloitu askelvaste säröytyneessä verkossa

Kuvasta voi havaita, että vaihejännitteen 2. harmoninen aiheuttaa lievää värähtelyä välipiirin jännitteessä ja kuristimien virroissa. Tilanne ei kuitenkaan ole ongelmallinen niin kauan kuin tyristorisilta voi tahdistua säröytyneisiin jännitteisiin.

Verkkokatkoksen jälkeen ehkäpä ongelmallisin tilanne on verkkojännitteen notkahdus jarrutuksen aikana. Tämä saattaa aiheuttaa DC-virran kasvamisen niin suureksi, ettei kommutointi onnistu ja silta kippaa. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan simuloitu kyseistä tapausta, koska tältä osin laitteisto toimii kuten normaali tyristorisilta.

## 8. Kommutoinnin analyysi

Yksisuuntaisessa sillassa virran kommutointi tyristorilta toiselle tapahtuu seuraavalla tavalla, kuva 8.1.



Kuva 8.1 Virran kommutointi tyristorilta toiselle

Kommutointi alkaa, kun tyristori V21 sytytetään. Virta siirtyy tyristorilta U21 tyristorille V21. Kommutoinnin ( $\mu$ ) aikana johtaa kolme tyristoria. Kommutointivirta  $I_k$  kulkee kahden vaiheen välillä s.e. lähdejännitteiden välillä on ainoastaan impedanssi  $2X_k$ . Kun  $I_k$  on yhtä suuri kuin tasavirta  $I$ , sammuu tyristori U21 ja virta  $I$  kulkee tyristorin V21 kautta.

Tyristorisillan +kiskon jännite muuntajan tähtipistettä vastaan kommutoinnin aikana on kahden vaihejännitteen keskiarvo.

$$U_{t+} = \frac{u_u + u_v}{2} \quad (8.1)$$

Kommutointipiiriin jännite on sama kuin verkon pääjännite

$$U_k = u_u - u_v = U_{uv} \quad (8.2)$$

Kommutointivirta on

$$I_k = \frac{U_k}{2X_k}$$

$$i_k = \frac{1}{2L_k} \int_{\alpha}^t \hat{u}_k \sin \omega t \cdot dt$$

$$i_k = \frac{\hat{u}_k}{2\omega L_k} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (8.3)$$

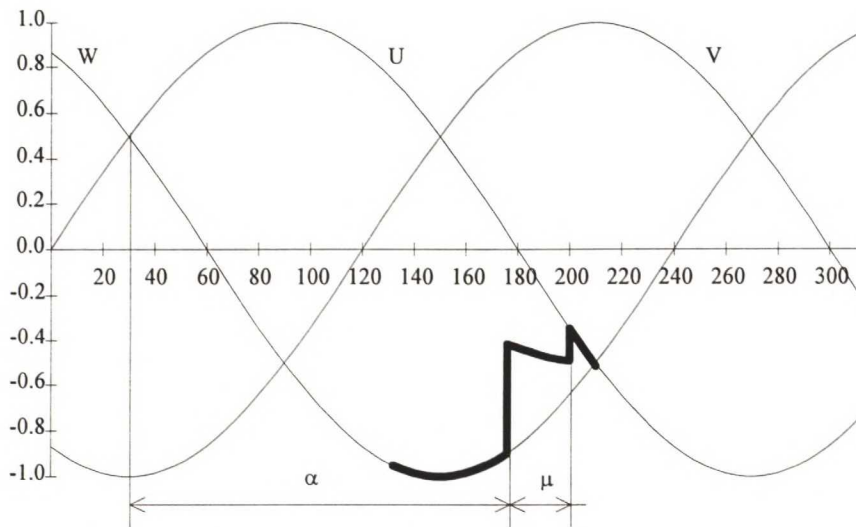
Kommutoinnin aikana sillan jännite on pienempi kuin ideaalinen ja se noudattaa yhtälöä

$$U_c = \frac{p}{\pi} \sqrt{2} U_p \sin \left( \frac{\pi}{p} \right) \cos \alpha \quad (\text{ideaalinen, ei kommutointia}) \quad (8.4)$$

$$U_c = \frac{p}{\pi} \sqrt{2} U_p \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cos \alpha + \frac{p X_k}{2\pi} I_d \quad (\text{kommutointi}) \quad (8.5)$$

jossa

$U_c$  tasajännite  
 $p$  suuntaajan pulssiluku  
 $U_p$  verkon pääjännitteen tehollisarvo  
 $X_k$  kommutoimisreaktanssi vaihetta kohti  
 $\alpha$  tyristorin sytytyskulma  
 $I_d$  sillan tasavirta



Kuva 8.2 Negatiivisen kiskon jännite kommutoinnin aikana

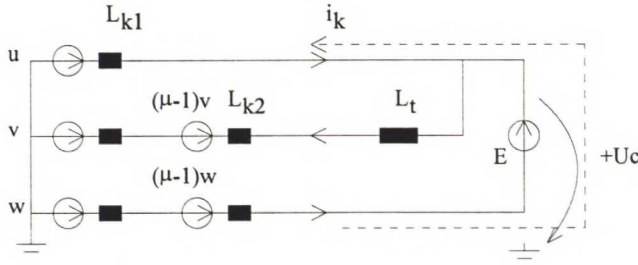
Kulma  $\mu$  on kommutoimiskulma eli se aika jona virta siirtyy seuraavalle sytytetylle tyristorille.

Kommutoinnin lisäksi on tyristorin sytytyksissä otettava huomioon toipumisaika, joka on tyristorin koosta riippuen 150...400  $\mu$ s. Tämä vastaa 50 Hz verkossa 2,7...7,2°:tta. Toipumisajaksi  $t_q$  kutsutaan sitä elvytysaikaa, jonka jälkeen tyristori vielä kestää tietyn jännitteen nousunopeuden  $du/dt$  syttymättä uudelleen /19/.

Vastarinnankytketyssä diodi-/tyristorisillassa tapahtuu yhden johtojakson (120°) aikana vähintään kuusi kommutointia (virta siirtyy kytkimeltä toiselle s.e. syttyvä ja jättävä kytkin johtavat samanaikaisesti) toimittaessa jatkuvalla kuristinvirralla ja aukollisella vaihevirralla. Verkojakson aikana tapahtuu siis vähintään 18 kommutointia, joista osa sattuu päällekkäin. Tässä tarkastelussa oletetaan, että syöttömuuntajan ja säästömuuntajan tähtipisteet ovat samassa potentiaalissa, mutta nollajohtimen virta ei vaikuta toimintaan. Piirin resistanssit oletetaan nolliksi ja kaikki kytkimet ovat ideaalisia. Välipiirin jännite  $E$  on vakio. Syöttömuuntajan ja kaapelin induktanssia merkitään  $L_{k1}$ :llä ja säästömuuntajan induktanssia  $L_{k2}$ :lla. Analyysissä viitataan kuviin 7.1 ja 7.2 ja niiden merkintöihin.



Aloitetaan tarkastelu V-vaiheen ylähaaran tyristorin sytytyksellä ( $t_0$ ), kun molemmat kuristimet ovat virrattomia. Ensimmäinen kommutointi tapahtuu, kun virta siirtyy U-vaiheen ylähaaran diodilta W-vaiheen alahaaran tyristorille ( $t_1$ ).



Kuva 8.3 Ensimmäinen kommutointi

Kommutointipiirin induktanssi

$$L_k = L_{k1} + \mu^2 L_{k1} + L_{k2} = L_{k1}(1 + \mu^2) + L_{k2} \quad (8.6)$$

Kommutointipiirin jännite on

$$u_k = \mu u_w + E - u_u \quad (8.7)$$

Piirin kommutointivirta on

$$i_k = \frac{u_k}{X_k} = \frac{\mu u_w + E - u_u}{\omega L_k} \quad (8.8)$$

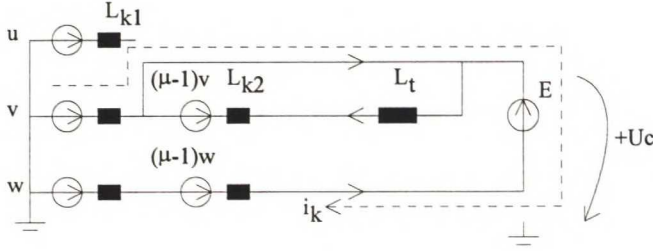
Välipiirin P-kiskon potentiaali kommutoinnin aikana

$$\begin{aligned} +Uc &= (\mu u_w + E) - i_k X_{k2} = (\mu u_w + E) - \frac{u_k}{X_k} X_{k2} \\ +Uc &= (\mu u_w + E) - (\mu u_w + E - u_u) \cdot \frac{\mu^2 L_{k1} + L_{k2}}{L_{k1}(1 + \mu^2) + L_{k2}} \end{aligned} \quad (8.9)$$

Kommutointijännite jakaantuu piirin induktanssien suhteessa. Oikeellisuuden voi tarkastaa asettamalla muuntosuhde ykköseksi ja toision kommutointi-induktanssi nolaksi. Välipiirin P-kiskon jännitteen yhtälö on silloin vastaava kuin 8.1.

Ensimmäisen kommutoinnin aikana saattaa alkaa myös toinen kommutointi. Virta siirtyy diodilta U11 diodille V11, jolloin neljä kytkintä johtaa samanaikaisesti.

Seuraava kommutointi tapahtuu, kun W-vaiheen alahaaran tyristorin W22 virta siirtyy V-vaiheen ylähaaran diodille V11 ( $t_2$ ) ja syntyy sisäinen kiertovirta.



Kuva 8.4 Toinen kommutointi

Kommutointipiirin induktanssi on sama kuin (8.6).

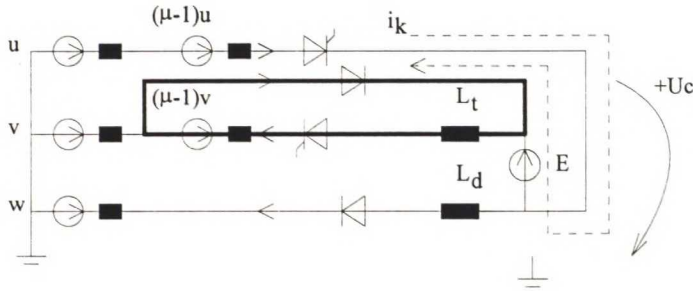
Kommutointipiirin jännite on vastaava kuin (8.7).

$$u_k = u_v - E - \mu u_w \quad (8.10)$$

Välipiirin P-kisko on kommutoinnin aikana potentiaalissa

$$+Uc = u_v - (u_v - E - \mu u_w) \cdot \frac{L_{k1}}{L_{k1}(1 + \mu^2) + L_{k2}} \quad (8.11)$$

Seuraava kommutointi tapahtuu ( $t_3$ ), kun U-vaiheen alahaaran tyristori U22 sytytetään. Tällöin sisäinen kiertovirta kommutoi V-vaiheen ylähaaran diodilta V11 alahaaran tyristorille, kuva 8.5.



Kuva 8.5 Kolmas kommutointi

Ennen kommutointia V-vaiheessa kulkee sisäinen kiertovirta ja ainoastaan kommutointi-induktanssi  $L_{k2}$  samassa vaiheessa on virrallinen. Ennen tyristorin U22 sytytystä välipiirin N-kisko on U-vaiheen korotetussa potentiaalissa  $\mu u_u$  ja P-kisko potentiaalissa  $\mu u_u + E$ . Kiertovirran energia on induktansseissa  $L_{k2}$  ja  $L_T$ .

Kommutointipiirin induktanssi on sama kuin (8.6).

Kommutointipiirin jännite on

$$u_k = \mu u_u + E - u_v \quad (8.12)$$

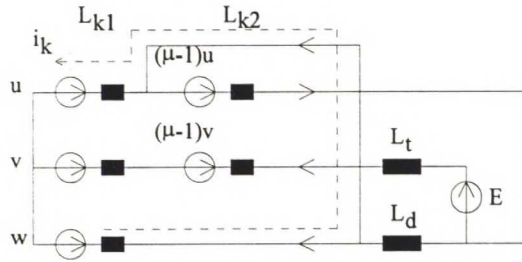
Kommutointivirta on

$$i_k = \frac{\mu u_u + E - u_v}{\omega L_k} \quad (8.13)$$

Välipiirin P-kisko on kommutoinnin aikana potentiaalissa

$$+U_c = \mu u_u - u_k \frac{\mu^2 L_{k1} + L_{k2}}{L_{k1}(1 + \mu^2) + L_{k2}} \quad (8.14)$$

Seuraavaksi W-vaiheen alahaaran diodin W12 virta kommutoi U-vaiheen alahaaran diodille U12 ja syntyy kiertovirta U-vaiheen sisällä ( $t_4$ ).



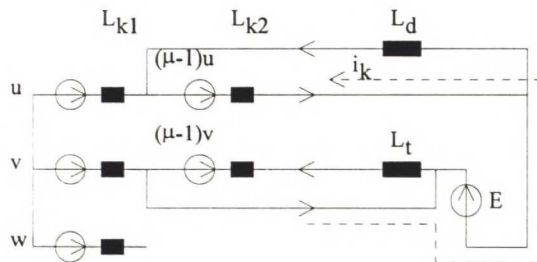
Kuva 8.6 Neljäs kommutointi

Kommutointi on normaali diodisillan kommutointi.

Kommutointipiirin induktanssi

$$L_k = 2L_{k1} \quad (8.15)$$

Seuraavaksi sammuu U-vaiheen alahaaran tyristori U22 ja sen virta kommutoi V-vaiheen ylähaaran diodille V11 ( $t_5$ ). Syntyy kiertovirta V-vaiheen sisällä ja välipiirissä kulkee latausvirta.



Kuva 8.7 Viides kommutointi

Kommutointi-induktanssi on sama kuin (8.6).

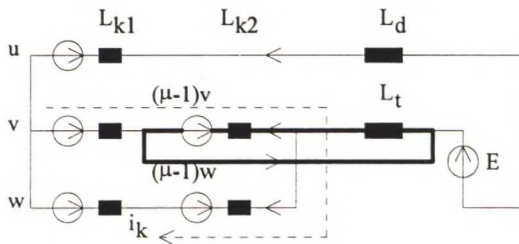
Kommutointipiirin jännite

$$u_k = u_v - E - \mu u_u \quad (8.16)$$

Välipiirin P-kisko on kommutoinnin aikana potentiaalissa

$$+U_c = u_v - u_k \frac{L_{k1}}{L_{k1}(1 + \mu^2) + L_{k2}} \quad (8.17)$$

Seuraavaksi aloitetaan sama sykli alusta, mutta nyt tyristorisillan kuristin on virrallinen ja tapahtuu kommutointi V-vaiheen ylähaaran tyristorilta V21 W-vaiheen ylähaaran tyristorille W21 ( $t_6$ ).



Kuva 8.8 Kuudes kommutointi

Kommutointipiirin induktanssi on

$$L_k = 2(\mu^2 L_{k1} + L_{k2}) \quad (8.18)$$

Kommutointipiirin jännite

$$u_k = \mu(u_v - u_w) \quad (8.19)$$

Tyristorisillan positiivinen kisko on potentiaalissa

$$U_{t+} = \frac{\mu(u_v + u_w)}{2} \quad (8.20)$$

mikä vastaa normaalia tyristorisillan kiskojännitettä (8.1) kommutoinnin aikana.

Yhden johtojakson aikana tapahtuu siis vähintään kuusi kommutointia. Näistä kahdella on merkitystä tyristorien luotettavan toiminnan kannalta: kolmas ja kuudes kommutointi. Näissä virta siirtyy tyristorilta toiselle tyristorille s.e. sisäinen kiertovirta sammuu ja syntyy uusi virtapiiri (joko vaiheiden välinen kiertovirta, kuudes kommutointi tai välipiirin purkausvirta, kolmas kommutointi). Toimittaessa jatkuvalla vaihevirralla kolmas ja kuudes kommutointi ovat vastaavat kuin kiertovirrattomassa tyristorisillassa.



## 9. Jännitteennostomuuntajan kytkentä

Tässä osassa tarkastellaan eri mahdollisuuksia kytkeä nostomuuntaja tyristorisil-  
lan ja syöttömuuntajan väliin. Muuntajan kytkennällä voidaan vaikuttaa kiertovir-  
toihin, tehokertoimeen ja hyötysuhteeseen. Kytkennän valinta vaikuttaa myös mi-  
toitukseen ja koko laitteiston hintaan. Kaikki mittaukset on tehty liitteen 1. mukai-  
sella laitteistolla.

### 9.1 Tähtipisteet yhdessä

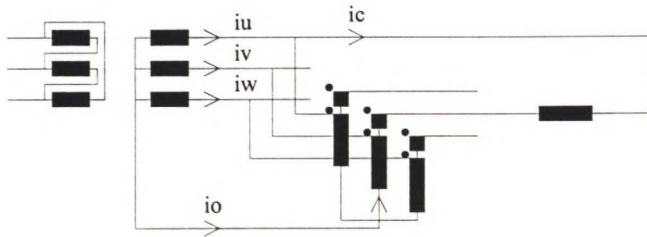
Todellisessa tilanteessa syöttömuuntajan ja säästömuuntajan tähtipisteiden yhdis-  
täminen aiheuttaa nollajohtimeen virran, jonka suuruus riippuu kiertovirrasta. Säästömuuntajan toision vaihejännite on säröytymätön. Ensiökäämin ja toision li-  
säkäämin virtalävistyksen kumoavat toisensa. Kun kiertovirta  $i_c$  kulkee kahden  
vaiheen välillä, voidaan nollajohtimen ja vaihejohtimien virroille kirjoittaa yhtälöt

$$i_o = (\mu - 1)i_c \quad (9.1)$$

$$i_u = i_c \quad (9.2)$$

$$i_v = -\mu i_c \quad (9.3)$$

$$i_w = 0 \quad (9.4)$$



Kuva 9.1 Kiertovirta kahden vaiheen välillä

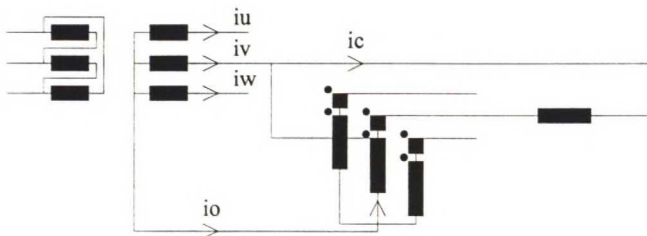
Virrat ovat lähes samat, kun kiertovirta kulkee saman vaiheen (V) sisällä.

$$i_o = (\mu - 1)i_c \quad (9.5)$$

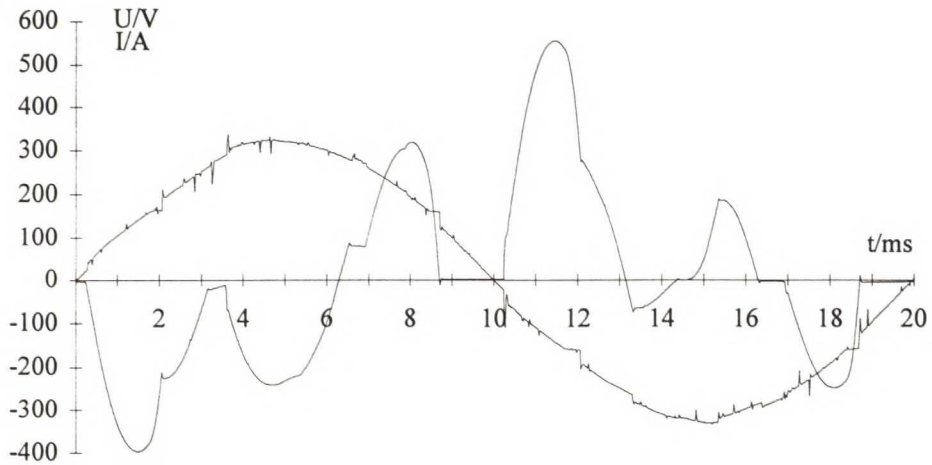
$$i_u = 0 \quad (9.6)$$

$$i_v = -(\mu - 1)i_c \quad (9.7)$$

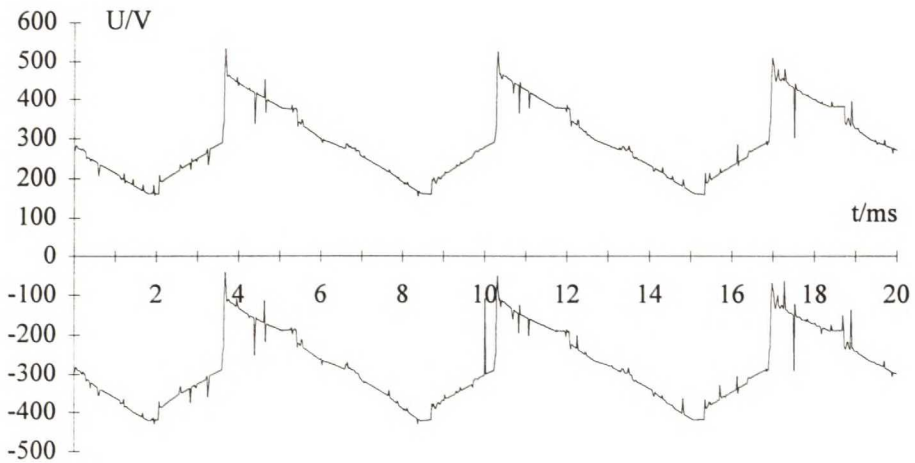
$$i_w = 0 \quad (9.8)$$



Kuva 9.2 Kiertovirta saman vaiheen sisällä



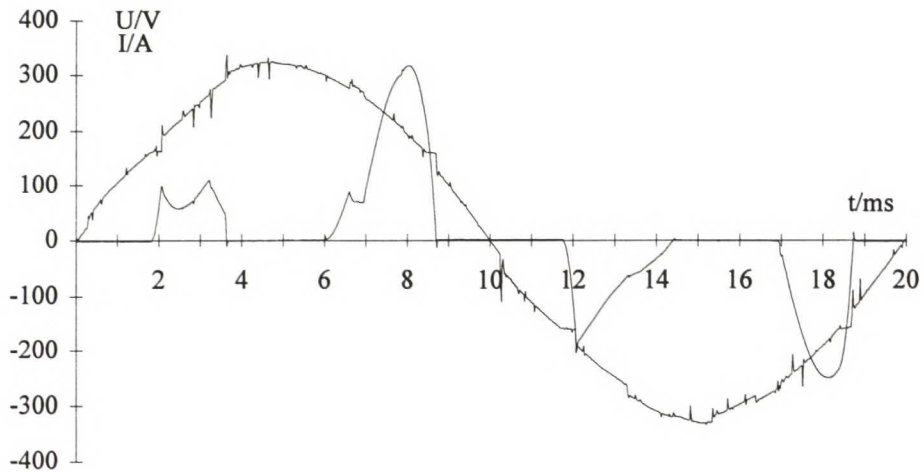
Kuva 9.3 Mitattu verkon vaihevirta ja -jännite,  $\alpha = 155^\circ$ ,  $U_c = 580V$



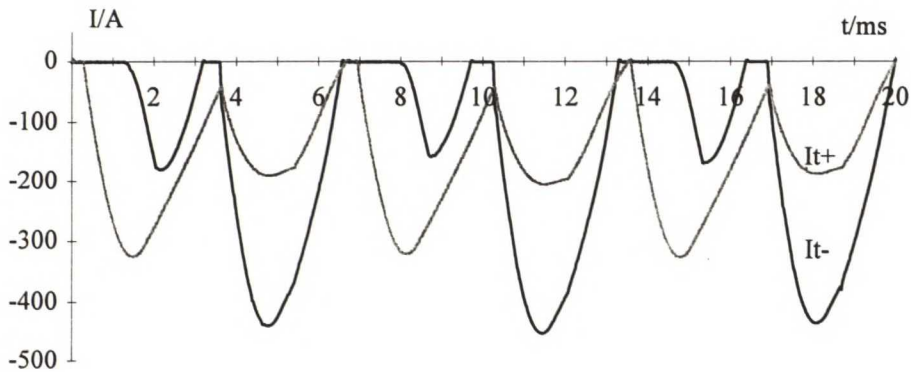
Kuva 9.4 Mitatut välipiirin kiskojännitteet yhteistä tähtipistettä vastaan,  $\alpha = 155^\circ$ ,  $U_c = 580V$

Verrattaessa simuloitua (kuva 7.3) ja mitattua (kuva 9.3) vaihevirtaa toisiinsa, voidaan todeta, että ne muistuttavat toisiaan. Merkittävimmät erot johtuvat siitä, että simulointiohjelma ei ota kommutointeja huomioon ja välipiirin jännite pidetään vakiona. Mitatusta vaihevirrasta voidaan kuitenkin selvästi erottaa samat komponentit kuin simuloidustakin.

Vastaavat kommutoinneista johtuvat erot löytyvät simuloiduista (kuva 7.12) ja mitatuista (kuva 9.4) kiskojännitteistä. Lisäksi kiskojen ja kaapeleiden impedanssit aiheuttavat eroja mitatun ja simuloidun tuloksen välillä.



Kuva 9.5 Mitattu diodisillan vaihevirta,  $\alpha = 155^\circ$ ,  $U_c = 580V$



Kuva 9.6 Mitatut tyristorisillan kiskojen virrat

Kuva 9.5 esittää diodisillan vaihevirtaa. Siitä voi erottaa kolme erityyppistä virtakomponenttia

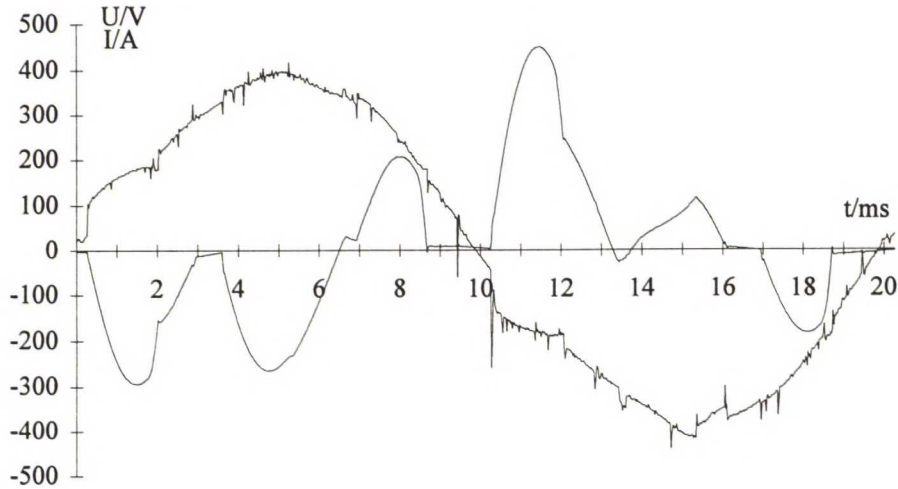
- sisäinen kiertovirta	2...3.5 ms	12...13.2 ms
- välipiirin latausvirta	6...7 ms	13.2...14.2 ms
- vaiheiden välinen kiertovirta	7...8.5 ms	17...18.5 ms

Kuvassa 9.6 on tyristorisillan kiskojen virrat. Kuvasta voi huomata, että ylähaaran sytytyksessä ( $t = 0.2$  ms) alahaaran tyristori syttyy vasta noin 1 ms kuluttua sytytyksestä. Alahaaran tyristorin sytytyksessä taas tyristorin virta on kiertovirran ja välipiirin purkausvirran summa. Kiertovirtojen takia tyristorien virrat eivät ole identtiset.

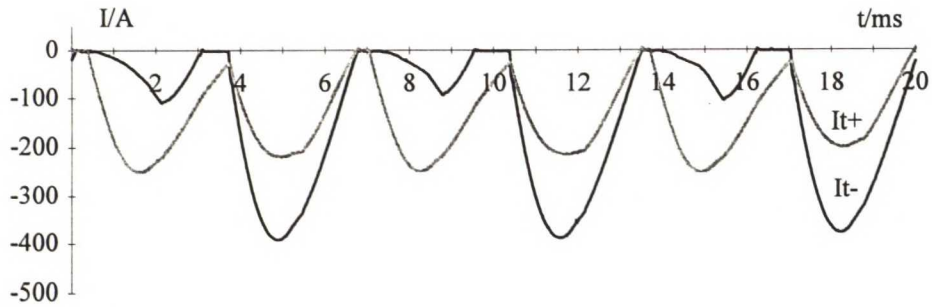
Tyristorisillan virtaa  $I_{t+}$  voi verrata kuvan 7.12 simuloituun kuristinvirtaan  $I_{Lt}$ . Simuloitu ja mitattu virta ovat lähes identtisiä.

## 9.2 Tähtipisteet erotettu

Mikäli syöttömuuntajan ja säästömuuntajan tähtipisteet erotetaan, magnetointi on pakotettu ja nollavuo oikosulkeutuu vaippamuuntajassa vaipan ja sydänmuuntajassa hajateiden kautta. Toision vaihejännitteet säröytyvät voimakkaasti (säästömuuntajan tähtipiste kelluu suhteessa syöttömuuntajan tähtipisteeseen), mutta pääjännitteet ovat säröytymättömiä.



Kuva 9.7 Mitattu verkon vaihevirta ja säästömuuntajan toision vaihejännite syötön tähtipistettä vastaan,  $\alpha = 155^\circ$ ,  $U_c = 580V$



Kuva 9.8 Mitatut tyristorisillan kiskojen virrat,  $\alpha = 155^\circ$

Toision vaihejännite (kuva 9.7) on huomattavan säröytynyttä pienelläkin kuormituksella. Vaihevirran kiertovirrat ovat huomattavasti pienempiä kuin kytkennässä, jossa tähtipisteet ovat yhdessä (kuva 9.2).

Tyristorisillan kiskovirroista voi todeta, että alahaaran tyristori syttyy heti kun ylähaaran tyristori sytytetetään (vrt. kuva 9.6). Lisäksi kiskovirrat ovat merkittävästi pienempiä kuin edellisessä kytkennässä.

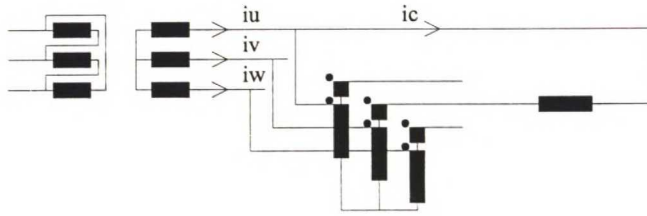


Mittausten mukaan kahden vaiheen välinen kiertovirta  $i_c$  generoi syöttömuuntajan toisien vaihevirtoihin komponentit

$$i_u = \frac{(\mu - 1)}{3} i_c + i_c \quad (9.9)$$

$$i_v = -\frac{2\mu + 1}{3} i_c \quad (9.10)$$

$$i_w = \frac{(\mu - 1)}{3} i_c \quad (9.11)$$



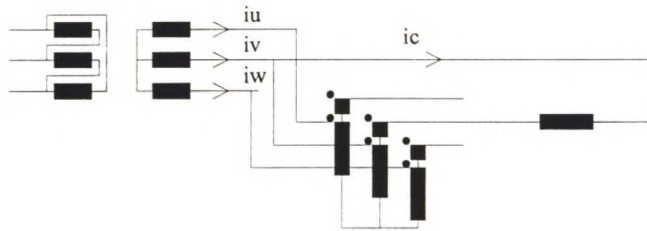
Kuva 9.9 Kiertovirta kahden vaiheen välillä

Kun kiertovirta kulkee saman vaiheen (V) sisällä, syöttömuuntajan vaihevirtoihin generoituu komponentit

$$i_u = \frac{(\mu - 1)}{3} i_c \quad (9.12)$$

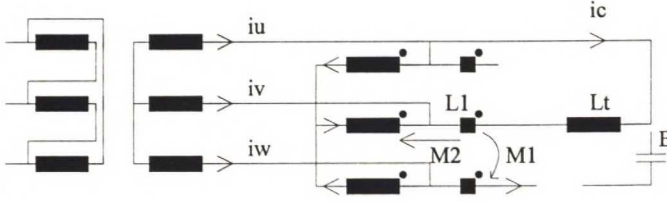
$$i_v = -\frac{2(\mu - 1)}{3} i_c \quad (9.13)$$

$$i_w = \frac{(\mu - 1)}{3} i_c \quad (9.14)$$



Kuva 9.10 Kiertovirta saman vaiheen sisällä

Edellä kuvattu analyysi koskee ainoastaan kiertovirran osuutta vaihevirrasta. Kiertovirta magnetoi muuntajasydäntä eikä vuolle synny vastavuota ja käämijännitteet nousevat kaikissa käämeissä. Käämijännitteen nousu  $\Delta U$  riippuu kiertovirrasta  $i_c$ , keskinäis-induktanssista  $M$  ja alahaaran tyristorin virrasta  $i_{w2}$ .



Kuva 9.11 Käämien väliset keskinäisinduktanssit

Lisäkäämin  $L_1$  jännitteenmuutokselle  $\Delta U$  kiertovirran aikana saadaan yhtälö (hajainduktanssit jätetään huomioimatta)

$$\Delta U = L_1 \frac{di_c}{dt} - \sum_{n=1}^5 M_n \frac{di_n}{dt} \quad (9.15)$$

Muissa käämeissä näkyy jännitteenmuutos  $\Delta U_m$

$$\Delta U_m = M_m \frac{di_c}{dt} - L_m \frac{di_m}{dt} - \sum_{n=1}^4 M_n \frac{di_n}{dt} \quad (9.16)$$

Tämä tarkoittaa sitä, että ylähaaran tyristorin kiertovirran aikana alahaaran tyristorin potentiaali nousee ja tyristori syttyy. Kuvista 9.7 ja 9.8 voi todeta tyristorin vaihejännitteen muutokset ja alahaaran tyristorin aikaisen syttymisen (verrattuna edellisen kohdan 9.1 kytkentään).

Kiertovirtoja voidaan rajoittaa kasvattamalla käämi-induktanssia  $L$  ja keskinäis-induktansseja  $M_n$ . Induktansseihin vaikuttavat käämikierrosten lukumäärä ja muuntajan rakenne.

$$\Lambda_h = \frac{\mu A}{l} \quad (9.17)$$

$$L_1 = N_1 N_1 \Lambda_h = N_1^2 \frac{\mu A}{l} \quad (9.18)$$

$$M_n = N_1 N_n \Lambda_h = N_1 N_n \frac{\mu A}{l} \quad (9.19)$$

jossa

$\Lambda_h$	päävuon kulkutien permeanssi
$\mu$	rautasydämen permeabiliteetti
$A$	rautasydämen poikkipinta-ala
$l$	vuon kulkutien pituus
$N_1$	lisäkäämin kierrosluku
$N_n$	käämin $n$ kierrosluku ( $n = 2, 3, 4, 5, 6$ )
$L_1$	lisäkäämin induktanssi
$M_n$	keskinäisinduktanssi käämien 1 ja $n$ välillä

Induktanssin kasvattaminen toisaalta pienentää kiertovirtaa ja toisaalta kasvattaa jännitteen muutoksia. Jännitemuutosten kasvaminen aikaistaa alahaaran tyristorin syttymistä ja samalla parantaa jarrutusvirran ja kiertovirran välistä suhdetta. Jännitemuutosten kasvaminen säröyttää säästömuuntajan toision vaihejännitteitä ja saattaa aiheuttaa muuntajasydämen kyllästymistä. Lisäksi hajainduktanssit kasvavat ja kommutointiaika pitenee.

Seuraavassa taulukossa (9.1) on mittaustuloksia samasta jarrutuslaitteistosta muuntajien tähtipisteet yhdistettynä ja erotettuna. Jarrutusteho on kummassakin mittauksessa sama ja tyristorin sytytyskulma on sama.

Taulukko 9.1 Mittaustuloksia laitteistosta jossa muuntajien tähtipisteet ovat yhdessä (Y) ja erotetut (E)

		Tähtipisteet yhdessä erotettu		erotus E - Y	
$I_v$ /A	Total rms	213	168	-45	-21%
	RMS (1)	153	123	-30	-20%
	pos. peak	563	449	-114	-20%
	neg. peak	402	292	-110	-27%
$I_{t+}$ /A	Total rms	191	158	-33	-17%
	Total mean	168	139	-29	-17%
	neg. peak	334	255	-79	-24%
$I_{vd}$ /A	Total rms	103	70	-33	-32%
	RMS (1)	60	38	-22	-37%
	Total mean	4	5	1	25%
	pos. peak	323	215	-108	-33%
	neg. peak	252	177	-75	-30%
$U_{v2}$ /V	Total rms	278	307	29	10%
	RMS (1)	277	274	-3	-1%
	pos. peak	473	767	294	62%
	neg. peak	453	768	315	70%
$U_c$ /V	Total rms	582	580	2	0%
	Pos. peak	608	611	3	0%
	Neg. peak	555	554	1	0%
$I_{t+}/I_v$ total rms		90%	94%	4%	
$I_{vd}/I_v$ total rms		48%	42%	-7%	

jossa

- $I_v$  verkon vaihevirta
- $I_{t+}$  tyristorisillan +kiskon virta
- $I_{vd}$  diodisillan vaihevirta
- $U_{v2}$  säästömuuntajan toision vaihejännite (säästömuuntajan tähtipiste)
- $U_c$  välipiirin jännite
- E - Y yhdistetyn ja erotetun tuloksen erotus (absoluuttiarvo ja suhteellinen arvo %:a yhteisen tähtipisteen mittaustuloksesta)

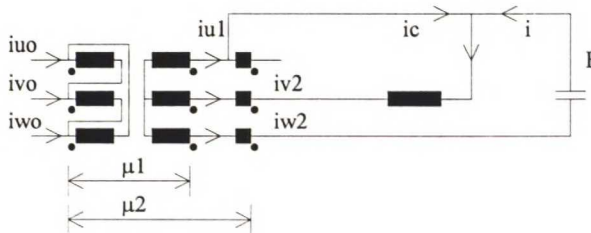
Tuloksia verrattaessa voidaan todeta, että erotettaessa tähtipisteet

- verkon vaihevirta pienenee (rms-arvo ja virtapiikit)
- tyristorisillan virta pienenee
- diodisillan virta (kiertovirrat + latausvirta) pienenee
- tyristorisillan virran osuus verkon vaihevirrasta kasvaa
- diodisillan virran osuus verkon vaihevirrasta pienenee
- säästömuuntajan toision vaihejännitteen rms-arvo kasvaa ja jännitepiikit kasvavat

Tähtipisteiden erottamisella voidaan siis pienentää vaihevirtoja, kiertovirtoja ja näinollen myös kytkimien tehorasituksia. Haittapuolena on säästömuuntajan rautahäviöiden kasvaminen. Tähtipisteen kytkennällä ei ole suoraa vaikutusta kommutointiin, mutta virtojen pieneminen lyhentää kommutointiaikaa. Näinollen erotetulla tähtipisteellä varustetulla jarrutuslaitteistolla voidaan syöttää verkkoon suurempi jarrutusteho.

### 9.3 Syöttömuuntajassa lisäulosotot

Erikoistapaus on syöttömuuntaja, jossa on lisäulosotot tyristorisilta varten. Kolmiokytkentäinen ensiö sallii tähtikytkentäisen toision yksivaiheisen kuormituksen. Kytkennän analogia muistuttaa ensimmäistä tapausta, jossa syöttömuuntajan ja säästömuuntajan tähtipisteet on yhdistetty.



Kuva 9.12 Kahden vaiheen välinen kiertovirta

Diodisillan ja tyristorisillan syöttöjännitteillä on sama tähtipiste, mutta varsinainen nollajohdinta ei ole. Diodisillan syöttöjännitteen muuntosuhdetta merkitään  $\mu_1$ :llä ja tyristorisillan syöttöjännitteen muuntosuhdetta  $\mu_2$ :lla. Muuntajan käämien virtalävistysten täytyy kumota toisensa. Kahden vaiheen välisen kiertovirran aikana syöttömuuntajan ensiön käämivirrat ovat

$$i'_u = \frac{1}{\mu_1} i_c \quad (9.20)$$

$$i'_v = -\frac{1}{\mu_2} (i_c + i_{w2}) \quad (9.21)$$

$$i'_w = \frac{1}{\mu_2} i_{w2} \quad (9.22)$$



Ja vastaavat verkon vaihevirratt

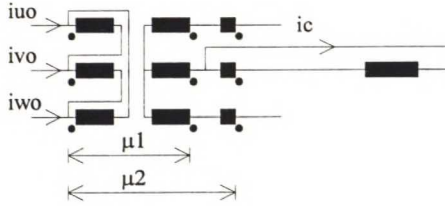
$$i_{uo} = i'_u - i'_w = \frac{1}{\mu_1} i_c - \frac{1}{\mu_2} i_{w2} \quad (9.23)$$

$$i_{vo} = i'_v - i'_u = -\frac{1}{\mu_2} (i_c + i_{w2}) - \frac{1}{\mu_1} i_c \quad (9.24)$$

$$i_{wo} = i'_w - i'_v = \frac{2}{\mu_2} i_{w2} + \frac{1}{\mu_2} i_c \quad (9.25)$$

Muuntajan Dy-kytkentä ei pakota W-vaihetta johtavaksi, jolloin verkkovirran yhtälöissä voidaan  $i_{w2}$  merkitä nolllaksi.

Vaiheen sisäinen kiertovirta kulkee toision lisäkäämin kautta.



Kuva 9.13 Vaiheen sisäinen kiertovirta

Sisäinen kiertovirta näkyy muuntajan ensiön vaihevirroissa

$$i_{uo} = i'_u = 0 \quad (9.26)$$

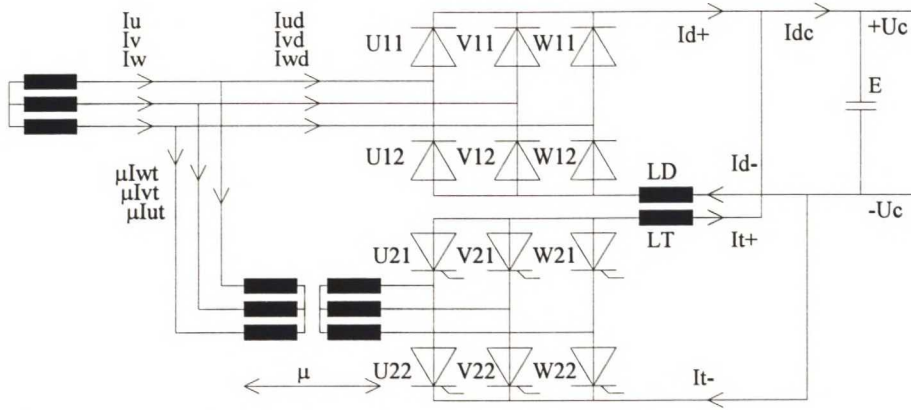
$$i_{vo} = i'_v = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 \mu_2} i_c \quad (9.27)$$

$$i_{wo} = i'_w = -\frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 \mu_2} i_c \quad (9.28)$$

Edellä on kuvattu kolme erilaista tapaa kytkeä jännitteennostomuuntaja tyristorisillalle. Kaikissa em. tapauksissa diodisillan ja tyristorisillan verkkojännitteiden välillä on galvaaninen yhteys, mistä seuraa kiertovirtoja vaiheiden välillä. Kiertovirtoja voidaan rajoittaa muuntajan induktansseja tai DC-kuristimen induktanssia kasvattamalla, mutta niitä ei voida kokonaan eliminoida.

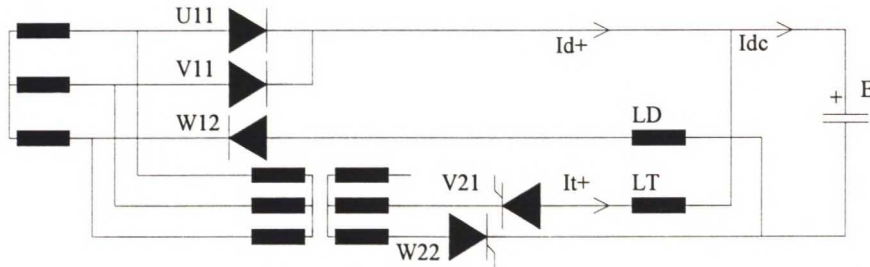
## 9.4 Erotettu nostomuuntaja

Eräs keino rajoittaa kiertovirtoja on kytkeä tyristorisillalle erotettu nostomuuntaja, kuva 9.14. Nostomuuntaja voi olla myös syöttömuuntajan erotettu toisiokäämi.



Kuva 9.14 Periaatteellinen kytkentä

Käytettäessä erotettua nostomuuntajaa tyristorisillan jännitteitä ei tarvitse tarkastella syöttömuuntajan tähtipistettä vastaan. Syöttömuuntajan suhteen välipiiri kelluu aina positiivisimman (johtavan!) diodin potentiaalissa. Koska nostomuuntaja on erotettu, siltojen välille ei synny epäsymmetrisiä kiertovirtoja.



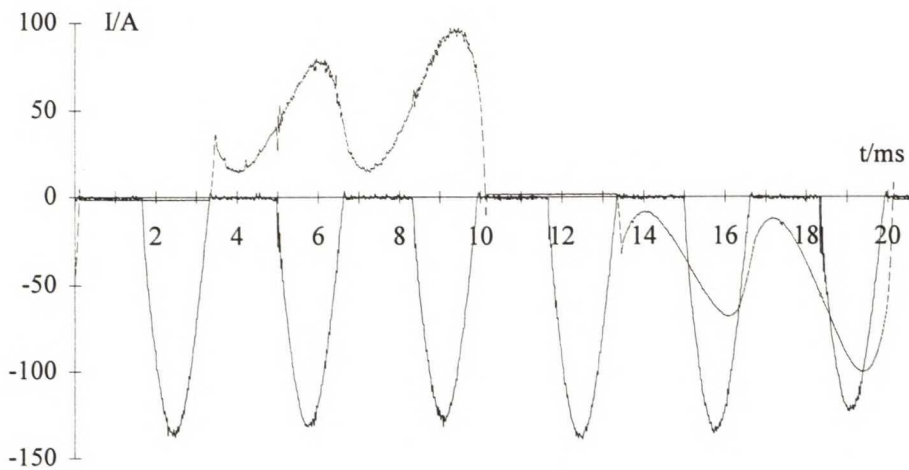
Kuva 9.15 Virtapiiri ylähaaran tyristorin V21 sytytyksessä

Välipiirin kondensaattorin virta kahden sytytyksen välillä on summa diodisillan ja tyristorisillan virrasta. Samaten verkon vaihevirta on siltojen vaihevirtojen summa. Kuvan 9.15 piiriin virroille voidaan kirjoittaa yhtälöt

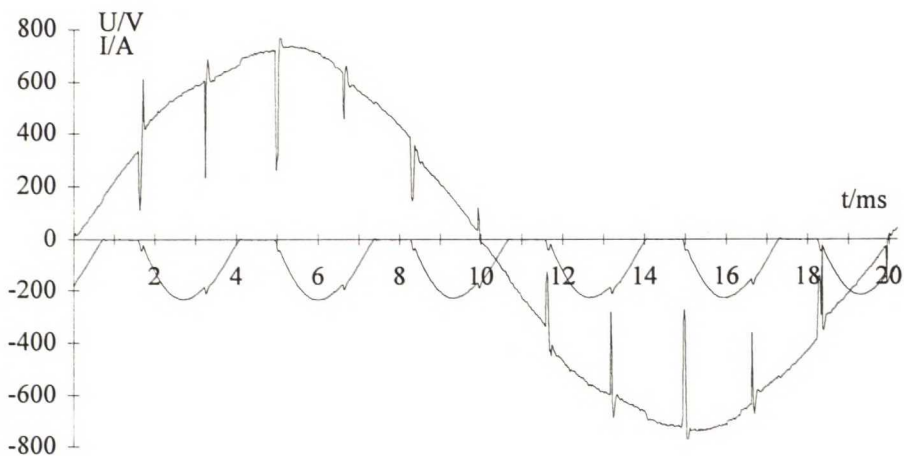
$$i_{d+} = \text{MAX} \left( 0, \frac{1}{L_d} \int_{t_0}^t (\text{MAX}(u_u, u_v) - E - u_w) dt \right) \quad (9.29)$$

$$i_{t+} = \text{MIN} \left( 0, \frac{1}{L_t} \int_{t_0}^t (\mu(u_v - u_w) - E) dt \right) \quad (9.30)$$

$$i_{dc} = i_{d+} + i_{t+} \quad (9.31)$$



Kuva 9.16 Mitattu tyristorisillan DC-virta,  $i_{t+}$  ja diodisillan vaihevirta  $i_{vd}$  tyhjäkäyvällä moottorilla,  $U_c = 535 \text{ V}$



Kuva 9.17 Tyristorisillan pääjännite  $U_{p2}$  ja DC-virta  $i_{t+}$  generaattorikuormalla,  $U_c = 565 \text{ V}$

Kuvissa 9.16 ja 9.17 on mittaustuloksia liitteen 1. mukaisesta laitteistosta, jossa säästömuuntaja on korvattu erotetulla muuntajalla. Muuntajan toisiojännite oli 505 V ja sytytyskulmana käytettiin  $150^\circ$ . Kuvista voi todeta, että kuristimen virta on aukollista pienelläkin sytytyskulmalla. Niinikään virtapulssit ovat varsin pieniä verrattuna vastaaviin säästömuuntajalla.

Taulukossa 9.2 on verrattu mittaustuloksia säästökytketyllä (tähtipisteet yhdessä) ja erotetulla muuntajalla.

*Taulukko 9.2 Erotetun muuntajan virrat verrattuna säästömuuntajalla varustettuun laitteistoon*

		EM	EM - SM	
$I_{t+}$ /A	Total rms	152	-39	-20%
	Total mean	119	-49	-29%
	neg. peak	252	-82	-25%
$I_{vd}$ /A	Total rms	1	-102	-99%
	RMS (1)	0	-60	-100%
	Total mean	0	-4	-100%
	pos. peak	8	-315	-98%
	neg. peak	8	-244	-97%
$U_c$ /V	Total rms	565	-17	-3%
	Pos. peak	589	-19	-3%
	Neg. peak	542	-13	-2%

jossa

$I_{t+}$  tyristorisillan +kiskon virta  
 $I_{vd}$  diodisillan vaihevirta  
 $U_c$  välipiirin jännite

Taulukon ensimmäisessä sarakkeessa on mittaustulokset käytettäessä erotettua muuntajaa (EM). Toisessa sarakkeessa on erotetun ja säästökytketyn (SM) muuntajan mittaustulosten erotus (EM - SM) absoluuttiarvoina. Kolmannessa sarakkeessa on erotuksen arvo prosentteina säästökytketyn muuntajan mittaustuloksesta. Taulukosta voi havaita, että virrat ovat huomattavan pieniä käytettäessä erotettua muuntajaa. Välipiirin jännite on niin suuri, että diodisilta ei juuri johda. Tyristorisillan virta on kokonaisuudessaan välipiirin jarrutusvirtaa.

Erotetun muuntajan edut (+) ja haitat (-) verrattuna säästömuuntajalla varustettuun laitteistoon:

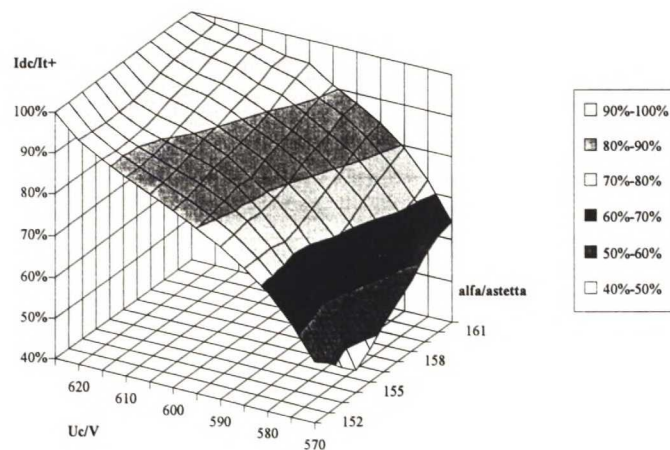
- erotetulla muuntajalla on isompi kommutointi-induktanssi
- erotettu muuntaja on huomattavasti kalliimpi, painavampi ja vaatii isomman tilan
- + ei epäsymmetrisiä kiertovirtoja
- + tyristorisilta, DC-kuristin ja sulakkeet voidaan mitoittaa pienemmiksi
- + vähemmän vaihevirran harmonisia
- + muuntajan toisiojännite vähemmän säröytynyt



## 10. Kiertovirran ja välipiirin virran suhde

Kiertovirran  $I_c$  ja välipiirin purkausvirran  $I_{dc}$  suhde riippuu sytytyskulmasta, inductansseista, muuntosuhteesta, välipiirin jännitteestä (moottorin jarrutusvirrasta) ja nostomuuntajan kytkennästä.

Ylähaaran tyristorin sytytyksessä alahaaran tyristorin virta kulkee välipiirin kondensaattorin kautta. Alahaaran tyristorin sytytyksessä koko ylähaaran tyristorin virta kulkee välipiirin kondensaattorin kautta. Mitä pienempää sytytyskulmaa käytetään, sitä suurempia ovat kiertovirrat. Mitä korkeampi on DC-jännite, sitä pienempiä ovat kiertovirrat. Lisäksi verkon ja laitteiston impedanssit vaikuttavat kytkimien johtoaikoihin, kommutointeihin ja sitä kautta kiertovirtoihin.



Kuva 10.1 Välipiirin virran  $I_{dc}$  suhde tyristorisillan kuristimen virtaan  $I_{t+}$  sytytyskulman ja DC-jännitteen funktiona

Kuvassa 10.1 on simuloitu tulos välipiirin jarrutusvirran  $I_{dc}$  ja tyristorisillan kuristimen virran  $I_{t+}$  suhteesta (rms-arvoja). Kuvastakin voi todeta, että jarrutus on tehokkainta suurella DC-jännitteellä ja suurella sytytyskulmalla.

Simulointimallissa muuntajien tähtipisteet on yhdistetty. Kun tähtipisteet erotetaan, kiertovirrat pienenevät ja hyötysuhde paranee. Simulointimalli ei huomioi kommutointeja, jotka myös vaikuttavat lopputulokseen.

Koska vain osa tyristorisillan virrasta on jarrutusvirtaa, täytyy siltä mitoittaa suuremmaksi kuin nimellinen jarrutusvirta vaatisi. Kun nimellispisteeksi valitaan

- $U_c = 580 \text{ V}$
- $\alpha = 155^\circ$

on  $I_{dc}/I_{t+}$  ainoastaan 66%. Näinollen siltä täytyy mitoittaa 1.5-kertaiseksi ( $1/0.66$ ) verrattuna nimelliseen jarrutusvirtaan.

Muuntosuhteen kasvattaminen lisää kommutointikykyä ja sallii korkeamman tasajännitteen jarrutuksen aikana. Simulointitulosten mukaan muuntosuhteen kasvattaminen 1.2:sta 1.3:een parantaa suhdetta  $I_{dc}/I_{t+}$  n. 15...20%, kun jarrutusteho

ja sytytyskulma pidetään samana. Mittauslaitteistossakin olisi ehkä kannattanut käyttää suurempaa muuntosuhdetta.

Mikäli diodisillan tilalle kytketään puoliohjattu silta, saadaan kiertovirrat pienemään <50%:iin nyt mitatuista. Puoliohjatulla sillalla voidaan lisäksi lataus suorittaa ilman latausvastusta ja -kontaktoria käyttämällä ohjauskulmaramppia. Samalla kuitenkin menetetään yksi merkittävä diodisillan etu: yksinkertainen sil-lanvaihtologiikka. Puoliohjattu silta vaatii omat mittaukset, tahdistuksen ja hilaoh-jaukset. Tästä ei ole kovin suuri askel käyttää täysin ohjattua siltaa (tyristorisilta) myöskin moottorisiltana. Tyristorisiltaa käytettäessä voidaan toinen DC-kuristin jättää pois, jolloin kustannuslisäys (tyristorit diodien tilalle) ei ole merkittävä.

11. Tehokerroin ja virran harmoniset

11.1 Tehokerroin

Liitteen 1. mukaisen jarrutuslaitteiston tehot mitattiin 3-vaiheisella Aaron-kytken-nällä. Säästömuuntajan ja syöttömuuntajan tähtipisteet oli erotettu. Tulosteena saatiin pätöteho  $P$ , loisteho  $Q$  ja tehokerroin  $\cos\varphi$  sytytyskulman funktiona. Moot-torin jarrutusvirta pidettiin vakiona (taajuusmuuttajan nimellisvirta). Tyristorisil-lan virta  $I_{t+}$  ja verkon vaihevirta  $I_v$  olivat mittausten aikana jatkuvia.

Taulukko 11.1 Jarrutusteho sytytyskulman funktiona

$\alpha$	$I_{t+}$	$U_c$	$I_v(1)$	$P(1)$	$Q(1)$	$\cos\varphi(1)$	$\lambda$	$S(1)$	$\varphi(1)$	$P_{dc}$
152	-327	577	264	-116	138	-0.646	-0.529	180	130	-189
154	-272	588	235	-118	108	-0.739	-0.631	160	138	-160
155	-248	595	225	-118	98	-0.769	-0.661	153	140	-148
156	-236	600	218	-118	89	-0.802	-0.696	148	143	-142
158	-209	610	204	-119	72	-0.856	-0.754	139	149	-127
160	-198	621	195	-119	59	-0.895	-0.802	133	153	-123
162	-191	627	189	-119	50	-0.922	-0.839	129	157	-120

jossa

$\alpha$	sytytyskulma / °
$I_{t+}$	tyristorisillan positiivisen kiskon virran keskiarvo / A
$U_c$	välipiirin DC-jännitteen keskiarvo / V
$I_v(1)$	koko laitteiston vaihevirran perusaallon tehollisarvo / A
$P(1)$	koko laitteiston perusaallon pätöteho / kW
$Q(1)$	koko laitteiston perusaallon loisteho / kVAr
$\cos\varphi(1)$	koko laitteiston perusaallon vaihesiirtokulma
$\lambda$	mittaustuloksista laskettu koko laitteiston tehokerroin
$S(1)$	mittaustuloksista laskettu perusaallon näennäisteho / kVA
$\varphi(1)$	mittaustuloksista laskettu perusaallon vaihesiirtokulma / °
$P_{dc}$	tuloksista laskettu tyristorisillalle syötettävä DC-teho / kW



Tyristorisillalle syötettävä DC-teho  $P_{dc}$  on laskettu välipiirin jännitteen ja tyristorisillan positiivisen DC-kiskon virran tulona. Lopputulos ei ole kovin täsmällinen, koska tyristorisillan kiskojen virrat eivät ole identtiset. Verrattaessa DC-tehoa koko laitteiston näennäistehoon  $S(1)$ , voidaan todeta, että DC-virtaan sisältyy myös komponentti sisäisestä kiertovirrasta, joka ei näy laitteiston vaihevirrassa eikä näinollen myöskään näennäistehossa. Lisäksi on huomattava, että  $P_{dc}$  ei kuvaa välipiiristä otettua tehoa, vaan tyristorisillan läpi ajettavaa DC-tehoa, joka sisältää molemmat kiertovirtakomponentit.

Laitteiston tehokerroin on varsin huono verrattuna vastaavaan vastarinnankytettyyn tyristorisiltaan. Koska suuntaajakytkentöjen vaihevirta on sinimuodosta poikkeava, määritellään vastaavasti tehokerroin /14/

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \gamma \cos \varphi_1 \quad (11.1)$$

$$\gamma = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (11.2)$$

$\lambda$  on siis virran perusaaltosisällön  $\gamma$  ja perusaallon vaihesiirtokulman kosinin tulo.

Suuntaaja käyttäytyy verkon kannalta resistiivisen ja induktiivisen impedanssin kombinaationa. Syntyvä loisteho ei johdu tasavirtapiirin induktanssista vaan siitä, että virran ja jännitteen kesken syntyy vaihesiirto, kun tyristorin syttymistä viivästetään. Tältä osin puhutaan ohjausloistehosta.

Vastarinnankytetyssä diodi-/tyristorisillassa syntyy ohjausloistehon lisäksi loistehoa kiertovirran aiheuttamasta virran perusaallon siirtymästä. Tämän osoittaa myös mitattu  $\cos \varphi(1)$ , josta laskettu kulma  $\varphi(1)$  on huomattavasti pienempi kuin sytytyskulma.

Yhden johtojakson aikana tapahtuu useita kommutointeja eri puolijohdekytkimien välillä. Normaalin kommutoinnin aikana tapahtuu vaiheiden välinen oikosulku, mikä merkitsee induktiivista kuormitusta ja näkyy lisänä loistehossa (kommutointiloisteho).

Yhteenvetona voidaan todeta, että syntyvä loisteho koostuu sytytyskulman aiheuttamasta perusaallon siirtymästä, kiertovirran aiheuttamasta perusaallon siirtymästä, kommutoinnin aiheuttamasta induktiivisesta kuormituksesta ja virran huonosta perusaaltosisällöstä. Loistehoa syntyy sitä enemmän mitä pienempi on sytytyskulma.

Verkkoon syötettävä jarrutusteho  $P(1)$  on 60...99% tyristorisillan mitatusta DC-tehosta  $P_{dc}$ . Laitteiston tehokerroin on sitä parempi mitä korkeampi on

DC-jännite ja mitä suurempi on sytytyskulma. Voidaan sanoa, että tutkittu jarrutuslaitteisto kannattaa rakentaa, mikäli

- DC-jännite voidaan pitää suhteellisen korkeana,  $>1.15U_{cN}$
- sytytyskulma on suuri,  $>155^\circ$
- jarrutus ei ole jatkuva vaan jaksottaista

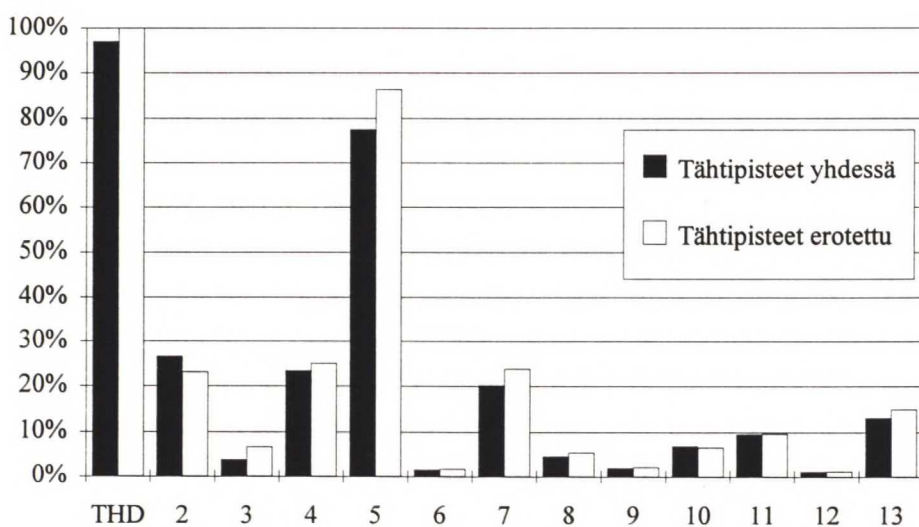
On kuitenkin huomattava, että sytytyskulma ei voi olla  $>155^\circ$  ja samaan aikaan DC-jännite  $>1.15U_{cN}$ , koska tällöin kommutointivara ei ole riittävä eikä kommutointijännite ole riittävä. Pienellä sytytyskulmalla ( $<155^\circ$ ) taas tehokerroin jää pieneksi ( $<70\%$ ) ja sekä tyristorisilta että säästömuuntaja täytyy mitoittaa nimellistä suuremmiksi. Tällöin investointikustannus ei ole enää merkittävästi pienempi verrattuna pakkokommutoituun vaihtosuuntaajaan.

## 11.2 Vaihevirran harmoniset

Tavallisen tyristorisillan vaihevirta sisältää ainoastaan kolmella jaottomia parittomia harmonisia komponentteja 5., 7., 11., 13. jne (täysin tasoittuneella virralla  $I_d$ ).

$$I_n = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \frac{\cos nx}{n} \quad n = pk \pm 1, \quad p = 6, \quad k = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (11.3)$$

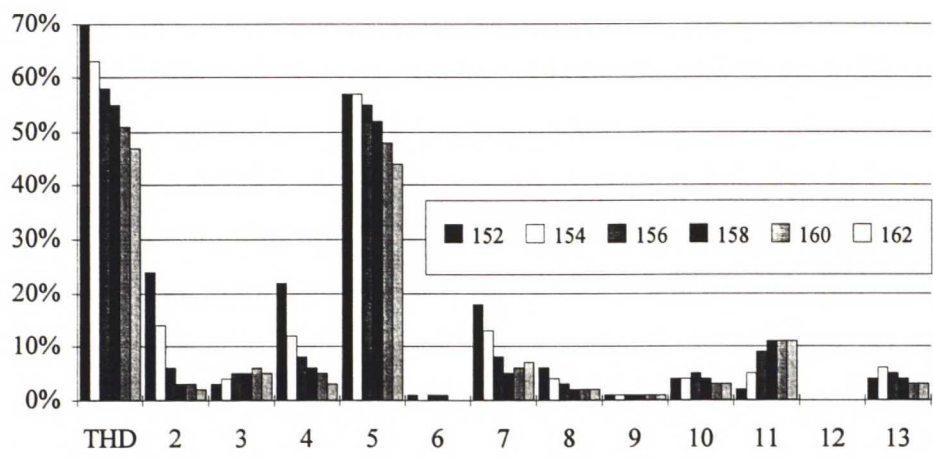
Vastarinnankytketyn diodi-/tyristorisillan vaihevirta sisältää kolme virtapulsia puolijaksolla (aukollinen vaihevirta). Tämän seurauksena 5. harmoninen kasvaa suhteettoman suureksi. Myös pienet parilliset (2. ja 4.) ovat varsin suuria (kuva 11.1). Tähtipisteen kytkentä ei vaikuta harmonisten suhteelliseen arvoon, mutta absoluuttiarvot ovat pienempiä, kun tähtipisteet on erotettu. Tämä johtuu siitä, että laitteiston kiertovirrat pienenevät, kun tähtipisteet erotetaan.



Kuva 11.1 Mitatut vaihevirran harmoniset tähtipisteet yhdessä ja erotettuna, sytytyskulma  $155^\circ$ , virta aukollista,  $U_c=580V$



Jatkuvalla vaihevirralla harmonisten osuus pienenee. Tämä johtuu siitä, että kiertovirrat pienenevät ja toisaalta välipiirin jarrutusvirta kasvaa (kuva 11.2). Virrat on mitattu jarrutettaessa taajuusmuuttajan nimellisellä virralla.



Kuva 11.2 Mitatut vaihevirran harmoniset sytytyskulman funktiona jatkuvalla vaihevirralla

Virran kokonaissärö THD (Total Harmonic Distortion) on virran harmonisten komponenttien  $I_n$  neliösumman suhde perusaaltovirtaan  $I_1$  /16/.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \tag{11.4}$$

Tyypillinen THD-arvo (tavallinen tyristorisilta) jatkuvalla virralla on 22% /16/. Vastaavasti tyypilliset virran harmoniset komponentit ovat taulukon 11.2 mukaiset.

Taulukko 11.2 Tyypilliset virran harmoniset %:a virran perusaallosta

<i>n</i>	5	7	11	13	17	19
<i>I<sub>n</sub>/I<sub>1</sub></i>	17	10	4	3	2	1

Virran harmoniset aiheuttavat verkon jännitteisiin harmonisia komponentteja. Nä-mä voidaan laskea kertomalla virta ko. taajuutta vastaavalla verkon impedanssilla.

Virran harmonisten rajoituksille ei ole yhtenäisiä kansainvälisiä standardeja. Useilla mailla on kuitenkin omat kansalliset rajoitukset ja suositukset /1, 10, 16, 20/.

## 12. Johtopäätökset

Tässä työssä on tutkittu tasajännitevälipiirillä varustetun säädetyn vaihtovirtakäytön verkkoonjarrutusta vastarinnankytketyn diodi-/tyristorisillan avulla.

Työn alussa on vertailtu eri jarrutusmenetelmiä. Vertailun tuloksena päädyttiin verkkoonjarrutukseen verkkokommutoivan tyristorisillan kautta. Perinteistä vastarinnankytkettyä tyristorisiltaa muunnettiin siten, että se voitaisiin poistaa joi-takin menetelmään liittyviä ongelmia ja puutteita:

- alennettu jännite jarrutuksessa
- monimutkainen sillanvaihtologiikka
- säädön ongelmat, jatkuva/aukollinen virta

Perusajatus oli, että diodisilta estää alijännitelaukaisut nopeissa muutostilan-teissa, kun moottorien jarrutus äkisti loppuu. Ei tarvita monimutkaista sillanvaihtologiikkaa. Tyristorisillan kommutointikykyä parannetaan nostamalla kommu-tointijännitettä. Samalla voidaan välipiirin jännite pitää nimellisenä jarrutuksen ai-kana. Tyristorien ohjaus tapahtuu vakiokulmalla, joka on riittävän pieni, ettei DC-jännite nouse ylijännitelaukaisurajalle kovassakaan moottorijarrutuksessa. Lisäksi vakiokulmaohjaus estää välipiirin jännitteen värähtelyt (epäsymmetrinen verkko). Suuritehoiset diodit ovat huomattavasti halvempia kuin vastaavat tyristorit, eivät-kä ne tarvitse ohjauspiirejä.

ABB:n kehittämää uutta DC-käyttöä, DCV 700 sovitettiin jarrutuskonseptiin. DC-käyttö soveltuu pienillä muutoksilla tasajännitevälipiirin verkkoonjarrutuk-seen. Käytössä on kaikki tarvittavat mittaukset ja suojaukset valmiina. Kommuni-kointi on yhteensopiva uuden AC-käytön kanssa. Mittauksia ja tutkimuksia varten rakennettiin jarrutuslaitteisto, joka sisältää diodisilta-syöttöyksikön ja sen rinnalla olevan "DCV 700 + säästömuuntaja" -jarrutusyksikön.

Koko verkkoyksikön toimintaa analysoitiin simuloimalla ja käytännön mit-tauksilla. Laitteiston toiminta on varsin monimutkainen verrattaessa sitä kiertovir-rattoman vastarinnankytketyn tyristorisillan toimintaan. Kun tavallisessa tyristori-sillassa on kaksi toimintatilaa; aukollinen virta/jatkuva virta, on vastarinnankytket-yssä diodi-/tyristorisillassa kolme toimintatilaa:

- aukollinen kuristinvirta, aukollinen vaihevirta
- jatkuva kuristinvirta, aukollinen vaihevirta
- jatkuva kuristinvirta, jatkuva vaihevirta

Jarrutuksen aikana laitteistossa esiintyy neljänlaisia virtoja: välipiirin purkausvir-ta, välipiirin latausvirta, kahden vaiheen välinen kiertovirta ja kiertovirta saman vaiheen sisällä siltojen välillä. Moottorisillan ohjaamattomuudesta johtuu, että molemmat sillat johtavat osittain samanaikaisesti ja virta vaihtelee moottorisillan ja generaattorisillan puolijohdekytkimien välillä. Yhden verkkojakson aikana saattaa tapahtua 18 kommutointia. Tavallisessa tyristorisillassa kommutointien määrä on enintään 6. Virrat ja kommutointi on analysoitu teoreettisesti, mutta

kommutointien lisääminen simulointiohjelmaan osoittautui ylivoimaisen työlääksi, joten kommutointien osalta simulointiohjelma toimii ideaalisessa verkossa.

Simuloimalla ja mittauksilla todettiin, että kiertovirrat ovat varsin suuria. Kiertovirtoja voidaan pienentää sytytyskulmaa kasvattamalla, säästömuuntajan tähtipisteen kytkennällä ja säästömuuntajan rakennetta muuttamalla.

Epäsymmetriset kiertovirrat voidaan täysin eliminoida käyttämällä säästömuuntajan tilalla galvaanisesti erotettua muuntajaa. Ratkaisu toimii erinomaisesti, mutta muuntajan hinta on noin viisinkertainen verrattuna säästömuuntajan hintaan.

Laitteisto synnyttää enemmän loistehoa kuin tavallinen tyristorisilta. Tämä aiheutuu kiertovirroista. Lisäksi kiertovirrat lisäävät harmonisten komponenttien määrää vaihevirrassa. Suuri loistehon määrä, virran harmoniset ja säästömuuntajan epäsymmetrinen kuormitus lisäävät syöttömuuntajan, säästömuuntajan ja tyristorisillan mitoitusarvetta.

Tutkittu jarrutuslaitteisto olisi kannattava ratkaisu, mikäli välipiirin jännite voitaisiin pitää korkeana ( $>1.15U_{cN}$ ) ja sytytyskulma suurena ( $>155^\circ$ ). Tällöin kuitenkin kommutointivara ei ole riittävä. Muussa tapauksessa tyristorisilta ja säästömuuntaja täytyy mitoittaa nimellistehoa suuremmiksi. Ratkaisu ei ole enää hinnaltaan kilpailukykyinen verrattaessa sitä esimerkiksi pakkokommutoivaan verkkovaihtosuuntaajaan.

Tutkitun kaltaisesta jarrutuskonseptista ei löytynyt artikkeleita kirjallisuudesta eikä julkaisuista. Viitteessä /17/ on tutkittu pienitehoista vastarinnankytkettyä diodi-/tyristorisiltaa, jossa on suuri kolmivaiheinduktanssi siltojen ja verkon välissä. Tyristorisillalla ei ole nostomuuntajaa, mutta 12-pulssiselle diodisillalle on kytketty monimutkainen virranjakomuuntaja. Tyristorisillalle on lisätty rajoitusvastukset. Viitteessä /7/ mainitaan, että diodisiltaa ei voi kytkeä tyristorisillan rinnalle, koska diodisillan jännite on liian korkea vaihtosuuntauksen aikana. Erotettu muuntaja diodi-/tyristorisillan nostomuuntajana on käytössä joillakin säädettävien sähkökäyttöjen valmistajilla.

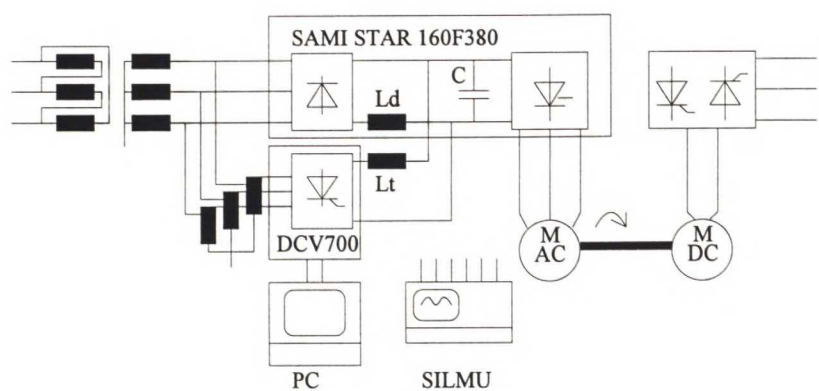


## VIITELUETTELO

- /1/ Anon. 1990. Suositus sähköverkon yliaaltojen rajoittamiseksi. Helsinki. Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y. Julkaisusarja 2/90. 11 s.
- /2/ ABB Drives. 1990. AXODYNE A.C. Main Drives with Induction Motors for 4-Quadrant Operation, Planning Catalogue. Lambertheim, ABB Antriebstechnik GmbH, D EA 5088 90 E - Edition 4.90. 47s.
- /3/ ABB Drives. 1991. MDAC Sectional Drives Users Manual. Helsinki, ABB Strömberg Drives oy, Industrial Drive Systems, MDAC GB 91-5. 152 s.
- /4/ ABB Strömberg Drives. 1987. Verkkovaihtosuuntaajan ohjaus, käsikirja. Helsinki, ABB Strömberg Drives, Tehoelektroniikka. Sisäinen dokumentti.
- /5/ Bonert, R. & Dawson, F. & Wiedenbrug, R. 1991. New Synchronization Method For Thyristor power Converters Connected to weak AC-Systems. 4th European Conference on Power Electronics and Applications, Firenze, 3.9. - 6.9.1991. EPE. S. 2.248 - 2.253.
- /6/ Boys, J.T. & Gates, G.F. & Green, A.W. 1988. 3-phase voltage sourced reversible rectifier. IEE Proceedings, Vol. 135Pt. B, No.7. s. 362 - 370.
- /7/ Clare, J. & Mayes, P. & Ray, W. 1992. Bidirectional Power Converter For Voltage Fed Inverter Machine Drives. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Toledo, Spain, 29.6. - 3.7.1992. Spain. Universidad Politecnica De Madrid. S. 189 - 194.
- /8/ Doralda, S. & Dubey, R. & Khan, B. 1991. a New Simultaneous Gating GTO Dual Converter Fed dc-Motor Drive Without Circulating Current. IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 27, NO. 3, s. 560 - 566.
- /9/ Engelmann, R. 1982. Static and Rotating Electromagnetic Devices. 10. p. New York. Maecel Dekker, inc. 524 s.
- /10/ IEEE Std 519-1992. 1993. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 100 s.
- /11/ Kloss, A. 1984. A Basic Guide to Power Electronics. Suffolk. John Wiley & Sons Ltd. 227 s.
- /12/ Kloss, A. 1989. Oberschwingungen, Beeinflussungsprobleme der Leistungselektronik. Berlin. vde-verlag GmbH. 222 s.



- /13/ Kumar, P. & Parimelalagan, R. & Ramaswami, B. 1993. A Microprocessor Based DC Drive Control Scheme Using Predictive Synchronization. IEEE Transaction on Industrial Electronics, VOL 40, NO. 4. s. 445 - 452.
- /14/ Kyyrä, J. 1992 - 93. Suuntaajatekniikka. Espoo, Teknillinen Korkeakoulu. Opetusmoniste, Svt-81.111.
- /15/ Luomi, J. 1991 - 92. Sähkömekaniikka. Espoo, Teknillinen Korkeakoulu. Opetusmoniste, Svt-17.100.
- /16/ Mohan, N & Undeland, T & Robbins, W. 1989. Power Electronics: converters, applications and design. Republic of Singapore, John Wiley & sons, Inc. 667s.
- /17/ Niermann, C. 1989. New rectifier circuits with low pollution and additional low cost inverter for energy recovery. 3rd european conference on Power Electronics and Applications. Aachen, Federal Republic of Germany, 9.-12.10.1989. Düsseldorf, EPE'89-Secretariat. S. 1131 - 1136
- /18/ Niiranen, J. 1993. Sähkökäytön digitaalinen ohjaus. Espoo, Teknillinen Korkeakoulu. Opetusmoniste, Svt-81.150.
- /19/ Niiranen, J. 1992. Tehoelektroniikan komponentit. Espoo, Teknillinen Korkeakoulu. Opetusmoniste, Svt-81.121.
- /20/ Pokkinen, M. Keskustelu diplomi-insinööri Mauno Pokkisen kanssa. ABB Industry Oy, Helsinki
- /21/ Pöyhönen, O. 1978. Sähkötekniikan käsikirja 1. Helsinki. Tammi. 670 s.
- /22/ Schlabach, L. 1986. Conduction Limits of a Three-Phase Controlled Converter in Inversion. IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-22, NO 2, s. 298 - 303.
- /23/ Segulier, G. 1986. Power Electronic Converters. London. North Oxford Academic Publishers Ltd. 361 s.
- /24/ Soljama, H. 1981. Mikroprosessorilla ohjattu tyristoritasasuuntaaja tasavirtamoottorin virtalähteenä, diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu. Otaniemi. 79 s.
- /25/ Vauhkonen, V. 1978. 12-pulssisen tasa- ja vaihtosuuntauslaitteiston konstruointi ja sen synnyttämien yliaaltojen analysointi, diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu. Otaniemi. 89 s.
- /26/ Virtanen, E. 1989. Muuntajien valinta yliaaltopitoisilla virroilla ja jännitteillä. Vaasa. ABB Strömberg Voimansiirto. sisäinen raportti. 16 s.



Kuva 1. Testauslaitteisto

Syöttömuuntaja

$U_1$	20 kV
$U_2$	400 V
$S$	2000 kVA
$L_k$	20 $\mu$ H
$R_k$	5 m $\Omega$

Säästömuuntaja

$\mu$	1.2
$S_t$	40 kVA
$U_1$	690 V
$L_k$	20 $\mu$ H
$R_k$	7 m $\Omega$

Syöttöyksikkö

SAFUS 160F415

$C$	9.9 mF
$L_d$	280 $\mu$ H
$L_t$	280 $\mu$ H

Taajuusmuuttaja

SAMI STAR 160F380

$U$	380 V
$S$	160 kVA

AC-moottori

$P$	110 kW
$U$	380 V
$n$	1500 rpm

DC-moottori

$P$	150 kW
$n$	2000 rpm

Tyristorivaihtosuuntaaja

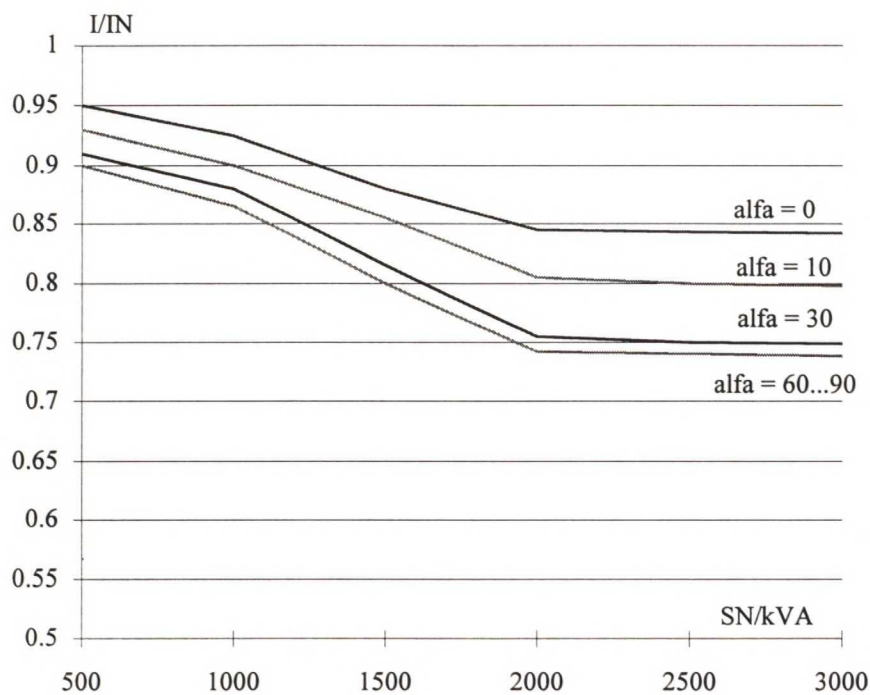
DCV 700

$U$	500 V
$I$	285 A

Mittalaite

SILMU

3	jännitemittapäätä	3 kV
3	virtashunttia	600 A



Kuva 1. Jakelumuuntajien kuormitettavuus tasavirtakäytössä /26/

Taulukko 1. Jakelumuuntajien tietoja /26/

S/kVA	U2N/V	I2N/A	Pk/W	Zk/%	a1/%
315	400	455	4000	4.4	3.6
500	400	722	5700	4.5	4.4
800	400	1155	7100	4.7	5.6
1000	400	1443	9200	5.0	7.0
1250	400	1804	10500	6.0	9.6
1600	400	2309	12700	6.0	13.3
2000	400	2887	14600	6.0	18.3
2500	693	2083	17300	7.0	18.8
3150	693	2624	21000	7.0	19.0